N° d'ordre : 18

THÈSES

présentées à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN

en vue de l'obtention du

TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

par

GÉRARD WIND

Ingénieur I. T. N.

Physicien Adjoint (au titre du Centre National de la Recherche Scientifique), au Laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Caen

Première Thèse : Etude et Construction de Bobines destinées à la production d'un Champ Magnétique pour Chambre de Wilson.

Deuxième Thèse : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le Mars 1954, devant la Commission d'Examen :

MM. M. SCHERER . . . . Président
P. LE ROUX . . . . Examinateur
A. COLOMBANI . . . Examinateur

N° d'ordre : 18

T H E S E S

présentées

DEVANT LA FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE CAEN

en vue de l'obtention du

TITRE D'INGENIEUR-DOCTEUR

par

GERARD WIND

Ingénieur I.T.N.
Physicien adjoint au titre du CNRS au

Laboratoire de Physique de la Faculté
Des Sciences de Caen

Ière Thèse : ETUDE ET CONSTRUCTION DE BOBINES DESTINEES A LA PRODUCTION D'UN CHAMP MAGNETIQUE POUR CHAMBRE DE WILSON.

2ème Thèse ; PROPOSITIONS DONNEES PAR LA FACULTE

Soutenues le Mars 1954 devant la Commission d'examen :

MM. M.SCHERER, Professeur (Président)
P.LE ROUX, Professeur (Examinateurs)
A.COLOMBANI, Professeur

FACULTE DES SCIENCES DE CAEN

168, rue Caponière

Doyen : M.MOREAU, Professeur
Assesseur : N.....

Personnel enseignant

MM.MOREAU, Doyen, Professeur (Botanique)
DANGEARD, Professeur (Géologie et Paléontologie)
SCHERER, Professeur (Physique Générale et Minéralogie)
LOZAC'H, Professeur (Chimie Générale)
PAILLOUX, Professeur (Mécanique rationnelle)
APERY, Professeur (Calcul différentiel et Intégral)
JACQUET, Professeur (Microbiologie)
N...., Professeur (Zoologie)
LE ROUX, Professeur sans chaire (Physique appliquée)
Mme WALTER-LEVY, Professeur sans chaire (Chimie)
MM.REY, Professeur sans chaire (Zoologie)
COLOMBANI, Professeur sans chaire (Physique)
BACHELET, Maître de conférences (Chimie générale)
VIALLE, Maître de conférences (Chimie organique et biologique)
ROSEAU, Maître de conférences (Mathématiques)
HERVE, Chargé d'enseignement (Mathématiques)
COJAN, Maître de conférences (Physique)
N....., Maître de conférences (Botanique)
Mme LE ROUX, Maître de conférences adjoint (Zoologie)
M.LAGET, Chef de travaux (Physique)
Mme R.CHAUVENET, Chef de travaux (Chimie)
MM.GRAFF, Chef de travaux (Chimie)
MESLIN, Chef de travaux (Botanique)
PAREYN, Chef de travaux (Géologie)
MABBOUX-STROMBERG, Chef de travaux (Physique)
LEGRAND, Chef de travaux (Chimie)
SAUDRAY, Chef de travaux (Zoologie)
R.CAUCAL, Secrétaire Principal des Facultés

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

A LA MEMOIRE DE MA MERE

A MON PERE

A MON MAITRE

Monsieur le Professeur M.Schérer

Hommage de ma profonde gratitude.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41542714_0007

SOMMAIRE

Le présent travail a pour objet l'étude et la réalisation de bobines sans fer, destinées à la production d'un champ magnétique pour une chambre de Wilson de 600 x 400 x 120 m/m. Ce champ présente une uniformité supérieure à 1% dans le volume utile et est obtenu avec une puissance de 53 Kw., y compris la puissance nécessaire au refroidissement.

Un premier chapitre est consacré au dimensionnement des bobines. Il débute par une étude de l'influence des différents paramètres qui interviennent dans l'expression du champ magnétique produit par un enroulement en fonction des données géométriques et caractéristiques électriques de ce dernier.

Puis une famille de courbes a été établie qui lie les valeurs de la puissance électrique consommée au poids de conducteur, à la densité de courant admise et au champ magnétique à obtenir dans le volume utile. Ces courbes ont permis de choisir les caractéristiques principales des enroulements.

La troisième partie de ce chapitre est consacrée à l'uniformité du champ. Par l'étude des variations de la composante axiale du champ dans le plan médian, elle montre comment l'uniformité a pu être obtenue en modifiant la forme de la section droite de l'enroulement.

Le deuxième chapitre passe en revue la construction des bobines. Il décrit le mode d'enroulement et de bridage des bobines et donne leurs caractéristiques électriques. Les derniers paragraphes de ce chapitre traitent du refroidissement (par circulation d'huile) et des circuits connexes (circuit électrique et circuit de contrôle).

Le troisième chapitre donne enfin les résultats des essais concernant les régimes électriques et l'établissement des températures au sein des bobines ainsi que les résultats expérimentaux relatifs au champ magnétique et sa topographie.

INTRODUCTION

Données du problème.

Il s'agit de la construction de bobines devant produire un champ magnétique pour une chambre de Wilson. Cette chambre est rectangulaire et a pour dimensions : 600 x 400 x 120 m/m.

Les conditions qui sont à remplir sont les suivantes :

1°) Le champ magnétique dans le volume utile sera d'environ 2.000 oersteds et ne présentera pas de fluctuations d'un point à l'autre supérieures à 1%.

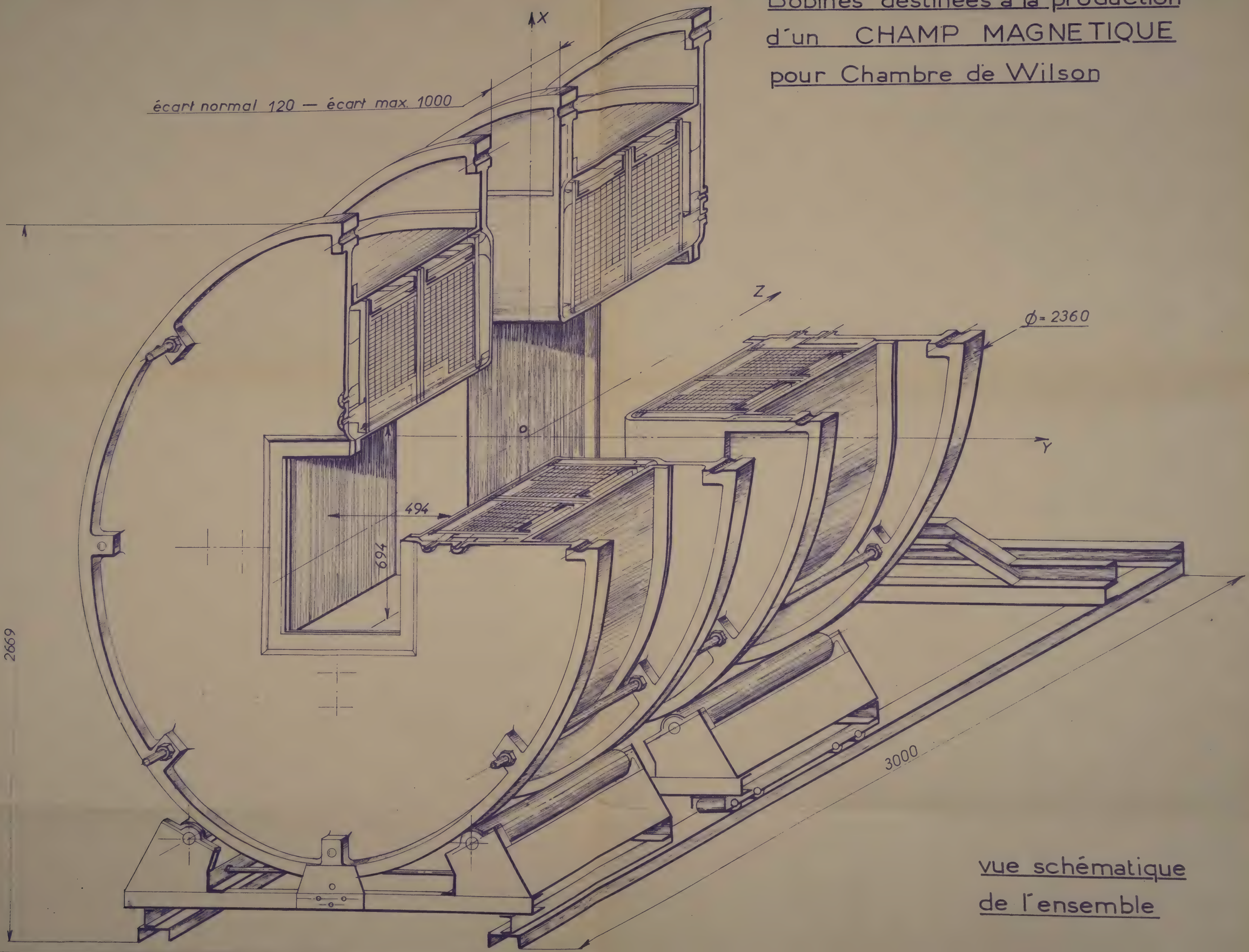
2°) Le gradient de température dans le volume utile ne doit pas dépasser 0,5°C.

3°) L'une des bobines doit être mobile en translation par rapport à l'autre en vue de faire varier l'écart entre les deux bobines et faciliter l'accès à la chambre.

4°) L'ensemble formé par les deux bobines doit pouvoir subir une rotation autour de son axe, ce qui permettra de travailler avec une orientation quelconque de la chambre.

5°) Les bobines seront à étudier de façon à ce que la puissance absorbée pour produire le champ soit la plus faible possible. L'obtention du maximum de rendement ($\frac{H^2 V}{8\pi} \times \frac{1}{P}$) où H est le champ dans le volume utile V, et P la puissance nécessaire à sa production, sera l'idée directrice de cette étude.

Bobines destinées à la production d'un CHAMP MAGNETIQUE pour Chambre de Wilson



vue schématique de l'ensemble

CHAPITRE I

DIMENSIONNEMENT des BOBINES - PROCEDE de CALCUL

Supposons que nous ayons à réaliser un champ H dans le volume utile, volume qui nous est imposé. La puissance électrique P, nécessaire à sa production, sera fonction de plusieurs paramètres : p, q, r,... Les dimensions des bobines seront déterminées en partant des valeurs p_o, q_o, r_o de ces paramètres qui font prendre à la fonction $P = f(H, p, q, r)$ sa valeur minima, soit P_o.

Désignons par P'_o la puissance minima P_o correspondant à H = 1500 oersteds, P'_o ne correspond pas forcément à la puissance nominale d'un groupe convertisseur fabriqué industriellement en série. C'est pourquoi nous déterminerons $P_o = f(H, p_o, q_o, r_o)$ pour plusieurs valeurs du champ H (supérieures à 1500 oe.) et tracerons les courbes $P_o = \Psi_1(H)$, $p_o = \Psi_2(H)$, $q_o = \Psi_3(H)$, $r_o = \Psi_4(H)$.

Nous choisirons une puissance telle, qu'elle soit supérieure à P'_o et légérement inférieure à la puissance nominale d'un groupe convertisseur.

P_o étant fixé, la fonction $\Psi_1(H)$, nous donnera la valeur du champ H_1 que nous essaierons de réaliser dans le volume utile, et enfin, Ψ_2, Ψ_3... nous fourniront, connaissant H_1, les valeurs des paramètres et par là même les dimensions et caractéristiques à adopter.

A) PARAMETRES.

Certaines grandeurs nous sont imposées à priori, à savoir :

1°) le volume utile

2°) les dimensions de la spire intérieure (AA' sur fig.1)

3°) l'écart minimum des deux enroulements, qui, compte tenu de la profondeur de la chambre, sera de 240m/m.

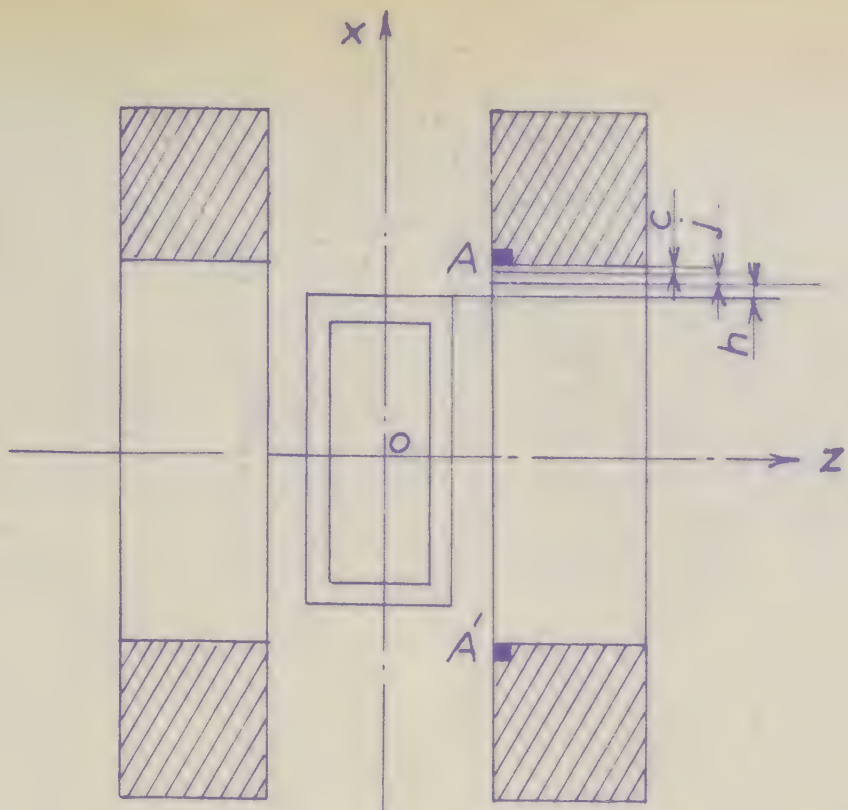


figure 1

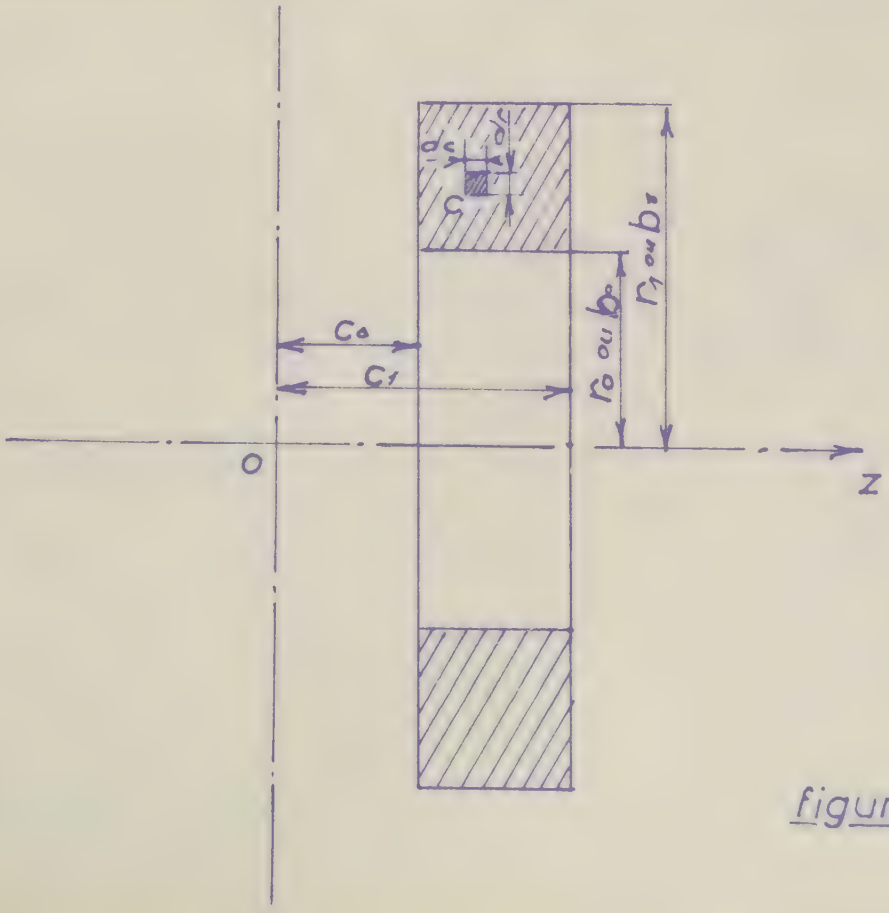


figure 2

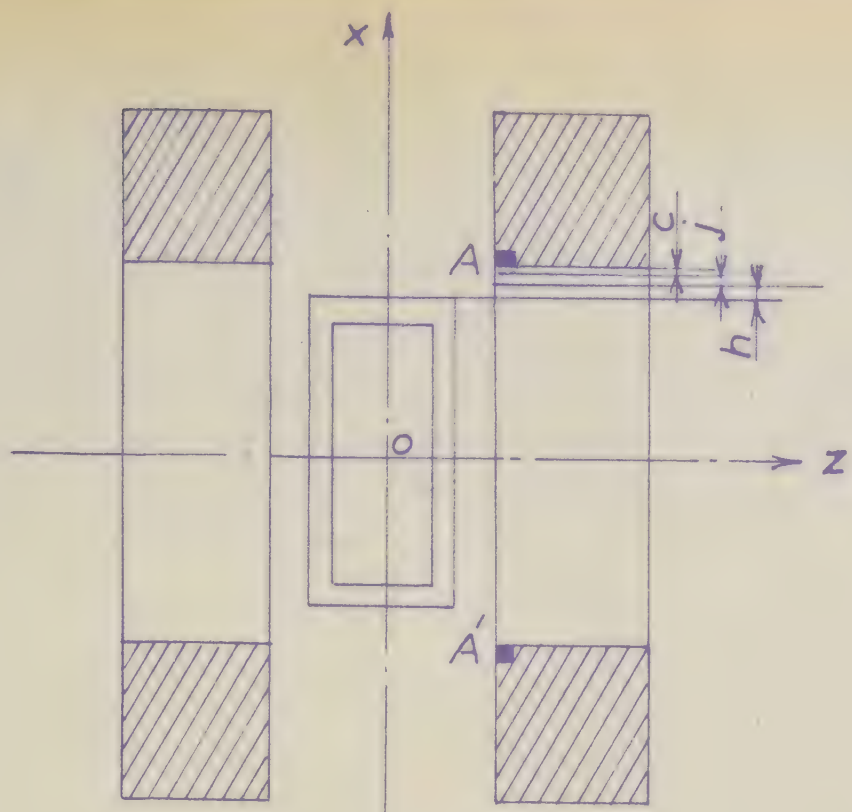


figure 1

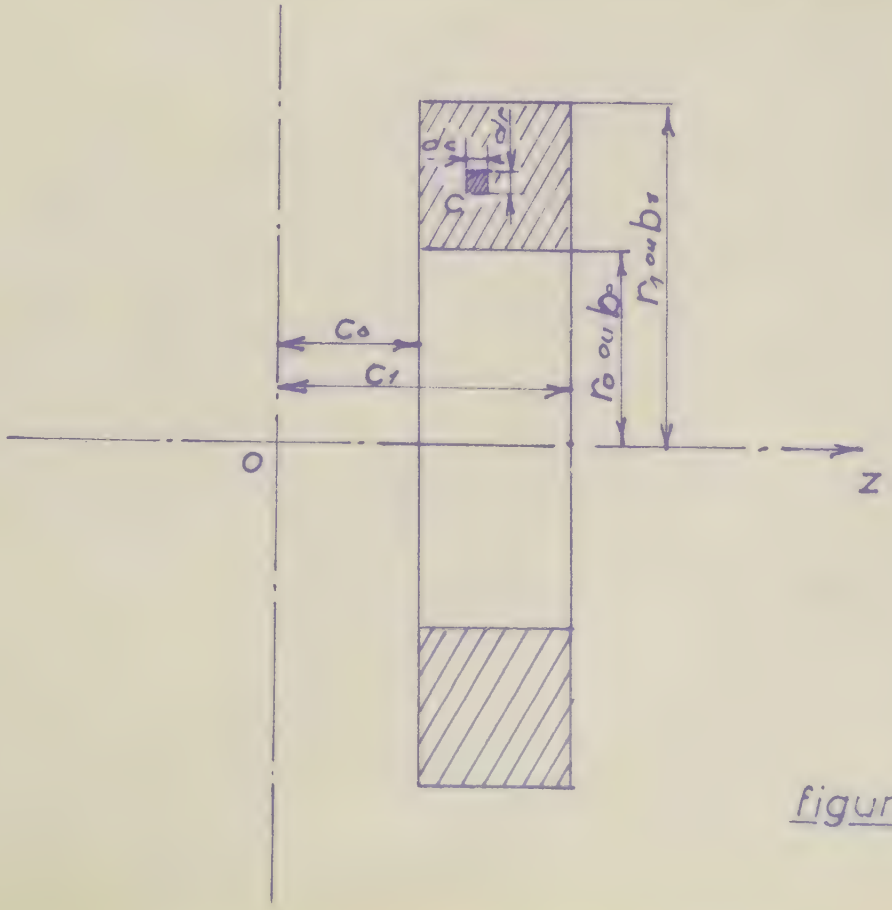


figure 2

Les autres paramètres qui interviennent dans l'expression de la puissance nécessaire pour produire un champ donné, sont les suivants :

1°) Coefficient de foisonnement. (η).

Considérons la section droite d'un enroulement, on sait que η est le rapport de la section totale à la section utile, la section utile étant la somme des sections des conducteurs, sans tenir compte de l'isolement.

Or, plus η est petit, plus le volume des bobines (pour un même nombre d'ampère-tours, et une même densité de courant : d) sera petit, la longueur des lignes de force et par là même la réluctance décroissent avec η.

Par ailleurs, la puissance est donnée par

$P = \frac{\rho l N I^2}{s} = \rho l N I \cdot d$

ou - ρ - est la résistivité du conducteur
- l - la longueur de la spire moyenne
- s - la section d'un conducteur
- I - l'intensité du courant
- d - la densité du courant

si NI et d restent constants, la puissance décroit avec η, en effet, la longueur moyenne l ne peut que diminuer avec η .

Il sera donc essentiel de donner à η la plus faible valeur possible. Nous verrons plus loin que η est de l'ordre de 1,4.

2°) Densité du courant.

Dans tout ce qui va suivre, nous supposerons que l'enroulement peut être remplacé par une densité de courant uniforme et considérerons la densité moyenne de courant : $D = \frac{d}{\eta}$

D constitue encore un paramètre qui entre d'une façon simple dans les formules.

Désignons par V le volume de conducteur d'une bobine, on a : $P = \rho l N I d = \rho V D^2 \eta^2$. (I)

En ce qui concerne le champ H, il sera pour une même bobine proportionnel à D (absence de matériaux ferromagnétiques), donc de la forme H = kD. Pour une bobine donnée, en ne faisant varier que la densité de courant, on aura : $P/P' = (H/H')^2$.

Par ailleurs, à champ magnétique constant, les autres paramètres variant de façon à le maintenir constant, si l'on fait varier D, la courbe P = f(D) présentera au moins un minimum.

P est en effet infini pour une densité D infinie (I); d'autre part, D ne peut prendre la valeur 0, mais aura au moins la valeur D_1 nécessaire pour produire H en faisant c_1-c_0 et b_1-b_0 infinis (cf fig.2) et puisqu'alors le volume de conducteur devient infini, $P = \rho V D^2 \eta^2$ tend aussi vers l'infini. Nous pouvons donc dès maintenant affirmer que la courbe P = f(D) admet pour asymptote verticale la droite $D = D_1$, que P devient infini avec D et que la courbe présente au moins un minimum $P_0 = f(D_0)$.

Section droite ou section totale de l'enroulement (S)

Le nombre d'ampère-tours étant donné par NI = SD, en faisant croître S à densité constante, on augmente le nombre d'ampère-tours, par contre, la réluctance croit elle aussi et dans des proportions variables.

L'influence de S est donc plus complexe, nous y reviendrons plus loin.

Forme de la section droite.

Supposons que la densité D ainsi que la section droite S restent constantes. Pour simplifier, supposons d'abord la section rectangulaire (cf.fig.2). La réluctance étant essentiellement fonction de la forme géométrique des bobines, elle variera si l'on fait varier $c = c_1-c_0$ et $b = b_1-b_0$ tout en gardant S = cb constant. Dans ce cas le paramètre qui caractérise la forme des bobines sera par exemple $\mu = \frac{b_1-b_0}{c_1-c_0}$

Nous pouvons évidemment déterminer μ pour que à S et D constants, la puissance dissipée dans les bobines soit minimum pour un champ donné.

Comme nous le verrons ultérieurement, le paramètre μ sera déterminé en partant de l'uniformité du champ à obtenir et non pas en se basant sur le rendement de l'appareil. Tout de même, pour ne pas nous éloigner trop de la forme optima du point de vue rendement, nous ferons une étude très sommaire en cherchant la valeur de $\frac{b_1-b_o}{c_1-c_o}$ telle que la réluctance soit à peu près minimum. Cette étude nous indiquera vers quelle forme de bobines (plates ou allongées) il faudra orienter la construction.

En résumé, P sera fonction de η , D, S et μ soit $P = f(\eta, D, S, \mu)$.

1°) Le paramètre η peut être négligé dans l'étude de P, nous avons en effet déjà vu qu'il doit avoir la plus faible valeur possible.

2°) Nous fixerons μ grossièrement et indépendamment de la puissance absorbée en essayant d'avoir une réluctance minima. La forme de la section droite fera l'objet d'une étude spéciale en vue de l'obtention de l'uniformité.

3°) Il restera $P = f(D,S)$.

Comme H est fonction de S, $H = \varphi(S)$ l'élimination de S entre les deux relations fournira $P = \rho(D,H)$.

En considérant H comme paramètre, D comme variable indépendante, nous aurons une famille de courbes qui nous permettra de choisir P et de déterminer H, D, ainsi que S. De ces grandeurs découleront le nombre d'ampère-tours et les dimensions des bobines.

Notations générales.

Dans les calculs qui vont suivre, et sauf indications contraires, le système de référence sera le trièdre Ox, y, z; O étant le centre, Ox, Oy et Oz les axes de symétrie de la chambre; Oz est en même temps l'axe de symétrie des bobines.

Un point quelconque où l'on calcule le champ ou le potentiel magnétique sera désigné par ses coordonnées x, y, z.

Comme nous ne considérerons que des spires parallèles au plan médian, xOy, les spires circulaires seront caractérisées par leur rayon r et leur distance Oz = c au plan médian; les spires rectangulaires par leur distance Oz = c et les demi-côtés du rectangle x = a; y = b.

Valeur à prendre pour le rapport μ

Pour évaluer μ dont un ordre de grandeur nous suffit, nous supposerons la section droite rectangulaire et les spires circulaires (cf. fig. 2).

Considérons une spire C de rayon r, parcourue par un courant D·dr.dc. En appelant Ω l'angle solide sous lequel elle est vue du point O, le champ magnétique produit en ce point sera :

$$dh = - D.dr.dc. \frac{\partial \Omega}{\partial c}$$

et le champ produit par un cylindre d'épaisseur dr et de rayon r sera :

$$dH = - D\, dr \int_{c_0}^{c} \frac{d\Omega}{\partial c}\, dc = - D\, dr \left[\Omega\right]_{c_0}^{c_1}$$

or, la valeur de Ω en fonction de r et c est :

$$\Omega = 2\pi \left[\frac{\sqrt{r^2+c^2} - c}{\sqrt{r^2+c^2}}\right] = 2\pi\left(1 - \frac{c}{\sqrt{r^2+c^2}}\right) \text{ et } dH = 2\pi D dr \left[\frac{c_1}{\sqrt{c_1^2+r^2}} - \frac{c_0}{\sqrt{c_0^2+r^2}}\right]$$

et pour une somme de cylindres d'épaisseur dr, on aura :

$$H = 2\pi D \int_{r_0}^{r_1} \left[\frac{c_1}{\sqrt{c_1^2+r^2}} - \frac{c_0}{\sqrt{c_0^2+r^2}}\right] dr$$

$$= 2\pi D \left[c_1 \log_e \left(\frac{r_1 + \sqrt{r_1^2+c_1^2}}{r_0 + \sqrt{r_0^2+c_1^2}}\right) - c_0 \log_e \left(\frac{r_1 + \sqrt{r_1^2+c_0^2}}{r_0 + \sqrt{r_0^2+c_0^2}}\right)\right]$$

En remplaçant dans cette formule $\log_e$ par $\frac{1}{0,435}\log_{10}$ et en exprimant D en Amp/cm^2, nous retrouverons la formule donnée par Cotton pour le calcul du champ direct produit par des bobines circulaires :

$$H = 2,89\, D r_0 \left[\log_{10} u_1 - \log_{10} u_2\right] \text{ avec } u = \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 + \alpha^2}}{1 + \sqrt{1 + \alpha^2}}$$

où l'on a posé : $r_1 = \beta r_0$; $c_0 = \alpha_0 r_0$; $c_1 = \alpha_1 r_0$

Pour connaître l'ordre de grandeur qu'il convient de donner à μ, nous supposerons la densité de courant D égale à l'unité dans la formule ci-dessus (D n'intervenant pas dans le calcul de la réluctance) et pour des valeurs constantes de la section $S = (c_1 - c_0)(b_1 - b_0)$ nous calculerons H en faisant varier le rapport μ. Les courbes du graphique (I) montrent les variations de H en fonction de μ pour plusieurs valeurs de S.

Le maximum de H correspond au minimum de réluctance. Par ailleurs les courbes montrent :

1°) Que le maximum de la fonction $H = \psi(\mu)$ n'est pas critique.

2°) Que l'on a intérêt à avoir un rapport à peu près égal à l'unité.

Vu la faible décroissance de H quand μ croit (pour $\mu > 1$) on aurait intérêt à orienter la construction vers des bobines plates si $\mu = 1$ ne pouvait être respecté.

Cependant la valeur de μ qui fournit le minimum de réluctance, n'est pas la même que celle qui fournit le minimum de puissance, puisque pour un même nombre d'ampère-tours et une même section, P croit avec μ (augmentation de la longueur de la spire moyenne) ce qui conduit à ne pas trop dépasser l'unité pour le paramètre considéré.

Nous ne nous attarderons pas davantage sur la recherche de la valeur optima de μ, la forme de la section droite étant déterminée plus loin par d'autres considérations.

Dimensions de la spire intérieure.

Entre le cadre extérieur de la chambre et la spire AA'(fig.1) il nous faut laisser un espace h + j + c.

-h- correspond à la hauteur dont certaines connexions et tuyauteries dépassent le cadre de la chambre.

-c- comprend l'épaisseur de paroi de la cuve enfermant les bobines.

-j- le jeu nécessaire si l'on désire faire coulisser la chambre à l'intérieur des bobines, ou rapprocher ces dernières de façon à réduire leur écart au strict minimum. La construction exige 100 m/m pour h + j + c. Pour ces raisons, la spire intérieure aura pour dimensions 600 x 800 m/m si elle est rectangulaire et 1000 m/m de diamètre si elle est circulaire.

Forme des spires.

Il est facile de montrer qu'à périmètre égal le champ produit par une spire rectangulaire est supérieur au champ produit par une spire circulaire.

Nous prendrons, pour simplifier, le champ au centre des spires (fig.3, z = 0) et nous utiliserons une spire carrée comme élément intermédiaire de comparaison.

Les champs ont pour valeur :

spire rectangulaire : $H_1 = \frac{4I\,ab}{\sqrt{a^2+b^2}} = 4I\sqrt{\frac{1}{a^2}+\frac{1}{b^2}}$

spire carrée : $H_1' = \frac{2I\sqrt{2}}{a}$

spire circulaire : $H_0 = \frac{2\pi I}{r}$

Les notations sont celles de la figure 3.

Considérons l'expression H_1 et posons a + b = k, soit p tel que a = k + p et b = k - p

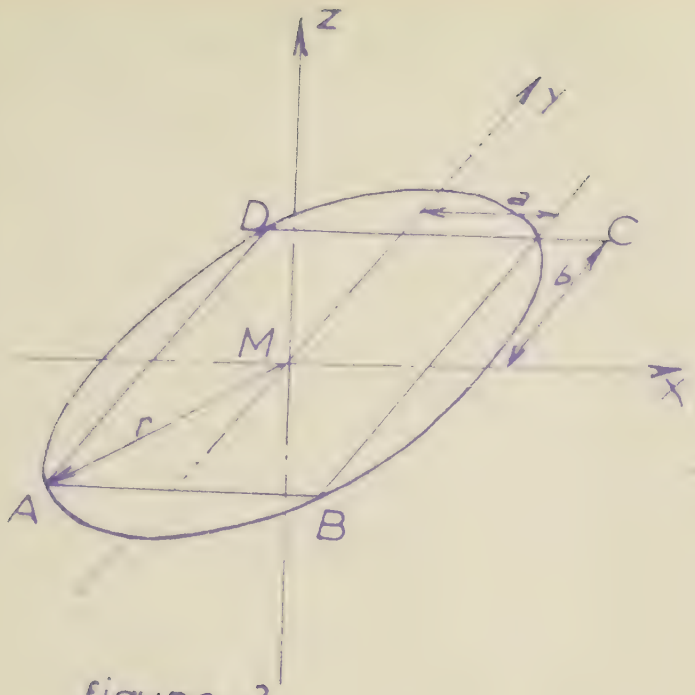


figure 3

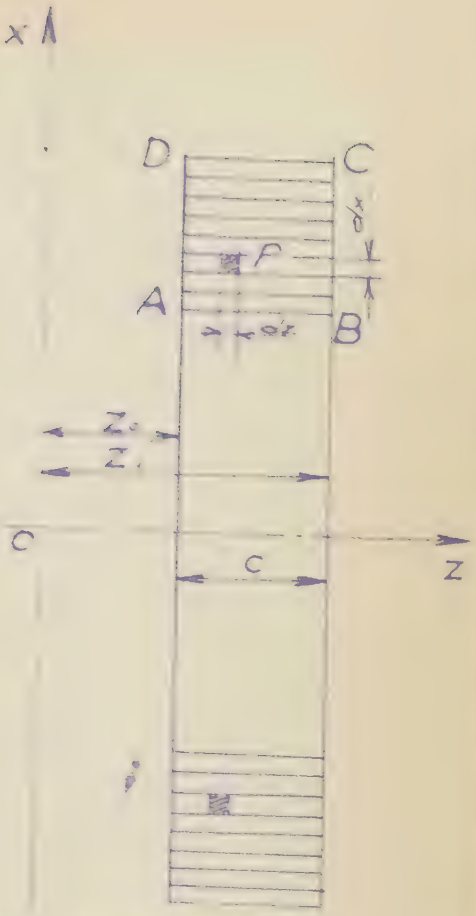


figure 4

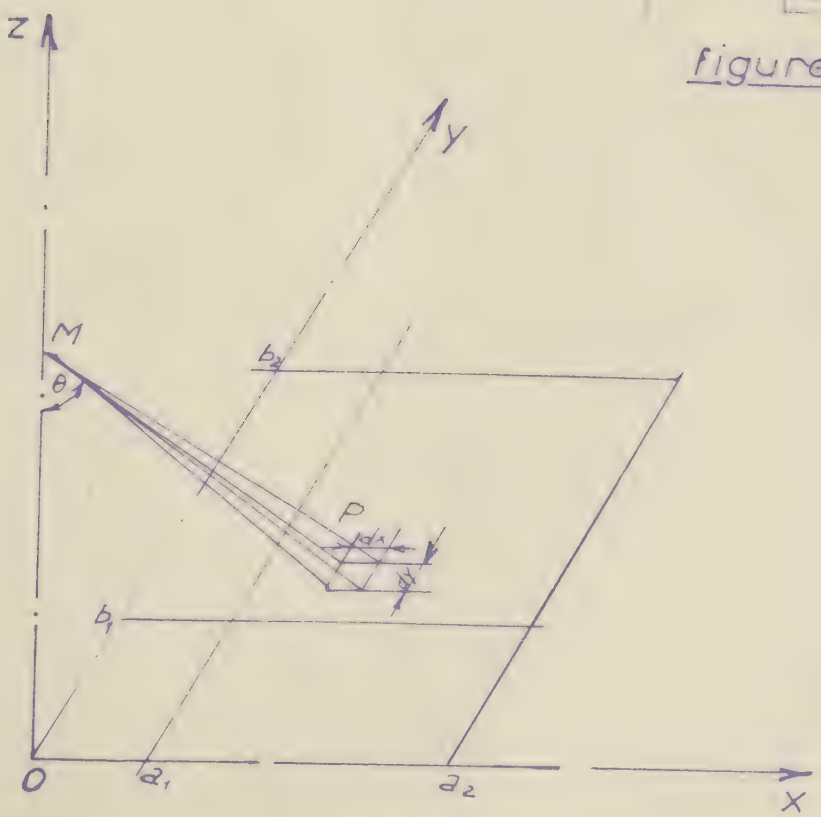


figure 5

il vient $H_1 = 4I\sqrt{\frac{1}{(k+p)^2} + \frac{1}{(k-p)^2}}$ dont on peut étudier la variation en fonction de p.

La dérivée de $\frac{1}{(k+p)^2} = \frac{1}{(k-p)^2}$ s'écrit $\frac{2}{(k-p)^3} - \frac{2}{(k+p)^3}$

Elle est positive puisque p est supposé positif. Donc H est minimum pour p = 0, c'est à dire dans le cas du carré.

Prenons maintenant la spire circulaire de rayon r_1 et de même périmètre que le carré, on a :

$2\pi r_1 = 8a$ soit $r_1 = \frac{4a}{\pi}$ et $H_o = \frac{\pi^2 I}{2a}$

et le rapport $\frac{Ho}{H_1} = \frac{\pi^2 I}{2a} \times \frac{a}{2I\sqrt{2}} = \frac{\pi^2}{8\sqrt{2}} = 0,872$

d'où, en conclusion : $H_o < H_1' < H_1$

La condition d'égalité des périmètres entraîne, les côtés du rectangle étant de 600 x 800 m/m, une spire circulaire de diamètre à peu près égal à 890 m/m. Les spires rectangulaires seraient donc plus avantageuses même si les spires circulaires n'avaient que 890 m/m de diamètre. Or, les conditions d'utilisation du champ necessitent des bobines de diamètre intérieur = 1000 m/m donnant par suite un champ inférieur à celui de la spire que nous venons de considérer.

On aura donc tout intérêt à prendre des spires rectangulaires d'autant plus que la puissance nécessitée sera $\frac{2\pi \times 50}{4(30+40)} = 1,12$ fois moindre (la puissance étant proportionnelle à la longueur de la spire).

Pour des raisons pratiques, ces spires seront à angles arrondis.

B - CHOIX de la DENSITE de COURANT et de la PUISSANCE -

Considérons (fig.4) une bobine dont la section droite ABCD = S est un carré de côté c. Supposons-la parcourue par une densité de courant moyenne D constante. En désignant par -l- la longueur de la spire moyenne, le volume V de conducteur est $V = \frac{S}{\eta} l$ (η = coefficient de foisonnement).

La puissance électrique dissipée dans le bobinage est : $P = \rho V D^2 \eta^2 = \rho S l D^2 \eta$

Le champ magnétique H au centre (O) produit par cette bobine sera donné par :

$$H = \iint \frac{D}{10} \frac{\partial \Omega}{\partial z} dx\, dz$$

Ω étant l'angle solide sous lequel on voit la spire Pdxdz du point O. Si nous gardons D constant en faisant varier S (S conservant toujours sa forme carrée et le sommet A restant fixe), à chaque valeur de S correspond une valeur de H et de P. Nous pouvons donc tracer P = f (H) pour cette valeur de D. En donnant ensuite à D la valeur D', nous en déduirons une nouvelle courbe P' = f (H') par les relations $P' = (\frac{D'}{D})^2 x\ P$ et $H' = \frac{D'}{D} H$.

Partant de cette famille de courbes, nous pouvons tracer le réseau $P = \varphi (D)$ avec H comme paramètre, famille qui nous permettra de faire le choix des éléments H, P et D.

Dans ce qui va suivre, nous verrons que P = f(D) (à H constant), passe par un minimum, en d'autres termes, il existe une densité (D) optima. Cependant, les minima ne sont pas critiques, ce qui légitime les approximations suivantes :

1°) La section droite sera supposée carrée (forme optima pour avoir le minimum de réluctance).

2°) Les spires seront supposées rectangulaires. Elles sont en réalité à angles arrondis, donc l'angle solide

est un peu plus faible que celui calculé à partir des spires rectangulaires, mais la différence est minime et par ailleurs la longueur de la spire moyenne étant un peu plus faible dans le cas réel, il en sera de même de la puissance. La puissance nécessaire à la production d'un champ H sera donc à peu de chose près la même dans les deux cas.

Calcul pratique du champ au centre.

Subdivisons la section droite comme l'indique la figure 4, en bobines élémentaires d'épaisseur radiale dx et ces bobines élémentaires en spires de section dx dz.

Considérons l'une de ces spires (P). Si Ω est l'angle solide sous lequel elle est vue du point O, le champ en O est donné par : $dH = \frac{-D}{10} \frac{\partial \Omega}{dz} \times dz \times dx$ (D est exprimé en Amp/cm^2, et le champ $d\Omega$ à une bobine élémentaire de longueur axiale -c- sera :

$$H = \int_{z_0}^{z_0+c} -\frac{D}{10} \frac{\delta \Omega}{\delta z} dz\, dx = \frac{-D}{10} \left[\Omega(z_0) - \Omega(z_0+c)\right] dx$$

Il suffira de tracer les courbes $\Omega(z)$ (graphique II) et la différence des ordonnées correspondant aux abcisses (z_0+c) et z_0 multipliée par $\frac{D\,dx}{10}$ donne H pour chaque bobine élémentaire.

En sommant, on obtient le champ pour toute la bobine.

Angle solide au-dessus d'un rectangle.

Considérons la figure 5, on a : $d\Omega = \frac{ds}{\overline{MP}^2} \cos\theta$

$\overline{MP}^2 = x^2 + y^2 + z^2$ et $\cos\theta = \frac{z}{[x^2+y^2+z^2]^{1/2}}$ donc $d\Omega = \frac{z\,dx\,dy}{\sqrt{z^2+x^2+y^2}^3}$

et $\Omega = \int_{b_1}^{b_2} dy \int_{a_1}^{a_2} \frac{z\,dx}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}^3}$

A) Calcul de $\int_{a_1}^{a_2} \frac{z\,dx}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}^3}$

posons $m^2 = z^2 + y^2$ et $x = m\,tg\,\varphi$ alors, $dx = \frac{m\,d\varphi}{\cos^2\varphi}$

$$\int \frac{z\,dx}{[z^2+x^2+y^2]^{3/2}} = z\int \frac{\cos\varphi\,d\varphi}{m^2} = z\sin\varphi = \frac{zx}{m^2\sqrt{m^2+x^2}}$$

d'où $$\int_{a_1}^{a_2} \frac{z\,dx}{[x^2+y^2+z^2]^{3/2}} = \left[\frac{zx}{(y^2+z^2)\sqrt{x^2+y^2+z^2}}\right]_{a_1}^{a_2} = \frac{za_2}{(y^2+z^2)\sqrt{z^2+y^2+a_2^2}} - \frac{za_1}{(y^2+z^2)\sqrt{z^2+y^2+a_1^2}}$$

B) Calcul de $$\int_{b_1}^{b_2} \frac{za\,dy}{(y^2+z^2)\sqrt{a^2+y^2+z^2}} = za\int \frac{dy}{(y^2+z^2)\sqrt{a^2+y^2+z^2}} = za\,J$$

Pour calculer J, faisons le changement de variable $y = m\,tg\,\varphi$; $a^2 + z^2 = m^2$, $dy = \frac{m\,d\varphi}{\cos^2\varphi}$

il vient :

$$J = \int \frac{d\varphi}{\cos\varphi(z^2+m^2tg^2\varphi)}$$

et en posant alors $\sin\varphi = u$ $du = \cos\varphi\,d\varphi$ et $d\varphi = \frac{du}{\cos\varphi}$

on a : $\cos^2\varphi = 1-u^2$; $tg\,\varphi = \frac{u}{\sqrt{1-u^2}}$ et

$$J = \int \frac{du}{(1-u^2)z^2+m^2u^2} = \int \frac{du}{a^2u^2+z^2} = \frac{1}{a^2}\int \frac{du}{u^2-k^2} \text{ avec } k = \frac{z}{a}$$

$J = \frac{1}{a^2} \times \frac{1}{k^2}$ arc tg(u/k) = en remplaçant u et k par leurs valeurs : $\frac{1}{za}$ arc tg $\frac{ya}{z\sqrt{z^2+a^2+y^2}}$

donc : $$\int_{b_1}^{b_2} \frac{za\,dy}{(y^2+z^2)\sqrt{a^2+y^2+z^2}} = \left[arc\,tg\,\frac{ya}{z\sqrt{y^2+z^2+a^2}}\right]_{b_1}^{b_2}$$

et finalement : Ω = arc tg $\left[\frac{a_2b_2}{z\sqrt{a^2+b^2+z^2}}\right]$ + arc tg $\left[\frac{a_1b_1}{z\sqrt{a_1^2+b_1^2+z^2}}\right]$

$$- \text{arc tg}\left[\frac{a_2b_1}{z\sqrt{a_2^2+b_1^2+z^2}}\right] - \text{arc tg}\left[\frac{a_1b_2}{z\sqrt{a_1^2+b_2^2+z^2}}\right]$$

Dans le cas particulier où M se trouve sur l'axe du rectangle et que l'on désigne les côtés du rectangle par

2a et 2b, on a :

$$\Omega = 4 \operatorname{arc\,tg}\left[\frac{ab}{z\sqrt{a^2+b^2+z^2}}\right]$$

Tableaux :

Dans les calculs numériques de $H=\frac{D}{10}\left[\Omega(z_o)-\Omega(z_o+c)\right]dx$, nous prendrons dx = 5 cm; Ω sera de même calculé pour des valeurs de z allant de 5 en 5 cm.

Il est à remarquer que, a et b étant exprimés en centimètres, et z étant constant, la valeur de $\frac{\Omega(a,b)+\Omega(a+5,b+5)}{2}$ diffère de $\Omega(a+2,5;\ b+2,5)$ de très peu. La première quantité est inférieure d'environ 1% à la seconde pour z = 40 cm où les variations de Ω en fonction de a ($\geqslant$ 30 cm) et b ($\geqslant$ 40 cm) sont les plus grandes.

De plus, comme dans la formule donnant H n'intervient que la différence entre les angles solides pour lesquels les valeurs de a et b sont les mêmes, et que les erreurs sont de même ordre et du même sens, il est légitime de calculer Ω avec 3 décimales; H sera connu avec une précision supérieure à 1%. Pour cette raison, nous avons jugé inutile de prendre dx inférieur à 5 cm.

Les spires rectangulaires filiformes, ou " cadres ", pour lesquels le tableau n°1 donne les valeurs de Ω en fonction de z, sont désignés par A, B, C.... Les valeurs de a et b qui correspondent à A, B ... sont indiquées dans le tableau I.

Le tableau n°II comprend, pour les valeurs de la section S = 25 - 100 - 225 - 400 - 625 - 900 - 1225 - 1600 - 3969 - et 7744 cm^2.

a) La valeur du champ pour la section considérée d'après la méthode indiquée page 11 pour D = 1 ucgs (10 Amp/cm^2).

b) la longueur de la spire moyenne

c) le volume et le poids du conducteur (cas du cuivre et de l'aluminium)

d) en fonction de D : 1°) les AT
2°) le champ H
3°) la puissance électrique

dépensée dans les deux cas du cuivre et de l'aluminium.

Tableau n°I - Valeurs de $\Omega(z)$

a et b \ z	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52	75	100
A a = 32,5 b = 42,5	5,360	4,500	3,872	3,316	2,824	2,424	2,084	1,796	1,564	1,368	0,784	0,488
B a = 37,5 b = 47,5	5,480	4,700	4,116	3,508	3,036	2,688	2,304	2,008	1,780	1,552	0,924	0,576
C a = 42,5 b = 52,5	5,564	4,860	4,328	3,840	3,400	3,000	2,652	2,364	2,092	1,868	1,152	0,732
D a = 47,5 b = 57,5	5,628	4,936	4,500	4,048	3,628	3,244	2,904	2,536	2,328	2,092	1,324	0,856
E a = 52,5 b = 62,5	5,680	5,092	4,660	4,224	3,820	3,452	3,124	2,828	2,548	2,304	1,516	0,992
F a = 57,5 b = 67,5	5,732	5,200	4,780	4,354	3,906	3,528	3,316	3,028	2,752	2,512	1,676	1,132
G a = 62,5 b = 72,5	5,776	5,288	4,884	4,500	4,152	3,776	3,492	3,208	2,932	2,688	1,832	1,272
H a = 67,5 b = 77,5	5,812	5,336	4,972	4,604	4,276	3,944	3,684	3,376	3,104	2,828	2,004	1,396

Tableau n°Ib - Complément du Tableau n°I

z \ a et b	72,5 82,5	77,5 87,5	82,5 92,5	87,5 97,5	92,5 102,5	97,5 107,5	102,5 112,5	107,5 117,5	112,5 122,5
12	5,408	5,460	5,508	5,552	5,592	5,628	5,652	5,688	5,708
75	2,144	2,320	2,440	2,500					
100	1,520	1,656	1,800	1,920	2,040	2,161	2,248	2,372	2,480

Tableau n°2 établi pour un entrefer de 24 cm.
à 40°C : résistivité aluminium : ρ al = 3,02 ρ al / ρ cu = 1,53 η = 1,4
" cuivre : ρ cu = 1,97

Section 5 x 5 = 25 cm2
Long.spire moyenne = 300 cm.
Volume de conducteur = 5.362 cm3
Poids Cu (d cu = 8,9) = 47,72 Kg
Poids Al (d al = 2,7) = 14,47 Kg

Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Cadre A $\Omega_{Z=12} - \Omega_{Z=17}$ = 0,628
dx = 5 cm.
Champ = 0,628 x 5 = 3,14oe.

D	AT (DS)	H	Pcu Puissance dans le cas du Cuivre	Pal Puissance dans le cas de l'alum.
50	1.250	15,7	51,75	79,17
75	1.875	23,5	114	178
100	2.500	31,4	207	316,7
150	3.750	47,1	465	711,4
200	5.000	62,8	828	1.267
250	6.250	78,5	1.293	1.978
300	7.500	94,2	1.863	2.850

Section 10 x 10 = 100 cm2
Long.spire moyenne = 320 cm.
Volume de conducteur = 22.880 cm3
Poids Cu = 203,63 Kg
Poids Al = 61,776 Kg

Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Cadre A : $\Omega_{12} - \Omega_{22}$: 1,184
" B : : 1,172
Total : 2,356
Champ total :
5 x 2,356 = 11,78 oe.

D	AT	H	Pcu	Pal
50	5.000	59,4	95,7	146
75	7.500	89,1	165	329
100	10.000	118,8	383	586
150	15.000	178,8	861	1.317
200	20.000	237,6	1.532	2.343
250	25.000	297	2.393	3.661
300	30.000	356	3.447	5,273

Tableau n°2 (suite)
(b)

Section 15 x 15 = 225 cm2
Long.spire moyenne = 340 cm
Vol.de conducteur = 54.858 cm3
Poids Cu = 488,236 Kg
Poids Al = 148,116 Kg

Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Cadre A $\Omega_{12}-\Omega_{27}$: 1,676
" B : 1,664
" C : 1,460
Total : 4,800
Champ = 4,8 x 5 = 24 oe.

D	AT	H	Pcu	Pal
50	11.250	120	529	809
75	16.875	180	1.192	1.823
100	22.500	240	2.119	3.242
150	33.750	360	4.767	7.293
200	45.000	480	8.476	12.968
250	56.250	600	13.243	20.261
300	67.500	720	19.071	29.178

Section 20 x 20 = 400 cm2
Long.spire moyenne = 360 cm
Vol.de conducteur = 102.960 cm3
Poids Cu = 916,344 Kg
Poids Al = 277,99 Kg

Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Cadre A $\Omega_{12}-\Omega_{32}$: 2,076
" B : 2,012
" C : 1,860
" D : 1,692
Total : 7,640
Champ = 5 x 7,640 = 38,2 oe.

D	AT	H	Pcu	Pal
50	20.000	191	993	1.519
75	30.000	286	2.235	3.420
100	40.000	382	3.974	6.080
150	60.000	573	8.941	13.679
200	80.000	764	15.896	24.320
250	100.000	955	24.837	38.000
300	120.000	1.146	35.766	54.721

Tableau n°2 (suite)

(c)

Section 25 x 25 = 625 cm2	Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Long.spire moyenne = 380 cm	Cadre A($\Omega_{12}-\Omega_{37}$: 2,416
Volume de conducteur = 170.259cm3	" B " : 2,396
Poids Cu = 1.515 Kg	" C " : 2,208
Poids Al = 459,7 Kg	" D " : 2,032
	" E " : 1,968
	11,020
	Champ = 11,020 x 5 = 55,1 Oe.

D	AT	H	Pcu	Pal
50	31.250	275,5	1.642	2.512
75	46.875	413	3.696	5.655
100	62.500	551	6.571	10.053
150	93.750	826	14.784	22.619
200	125.000	1.102	26.284	40.214
250	156.250	1.377	41.068	62.634
300	187.500	1.653	59.139	90.482

Section 30 x 30 = 900 cm2	Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Long.spire moyenne = 400 cm	6 premiers cadres (A à F)
Vol.de conducteur = 257.400 cm3	($\Omega_{12}-\Omega_{42}$) 14,728
Poids Cu = 2.290 Kg	Champ = 14,728 x 5 = 73,5 Oe.
Poids Al = 694,98 Kg	

D	AT	H	Pcu	Pal
50	45.000	367,5	2.483	3.798
75	67.500	551	5.590	8.550
100	95.000	735	9.935	15.200
150	135.000	1.102	22.353	34.200
200	180.000	1.470	39.741	60.803
250	225.000	1.837	62.093	95.002
300	270.000	2.205	89.415	136.804

Tableau n°2 (suite)

(d)

Section 35 x 35 = 1.225 cm2
Long.spire moyenne = 420 cm
Vol.de conducteur = 367.867 cm3
Poids Cu = 3.274 Kg
Poids Al = 993 Kg

Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Cadres A à G $(\Omega_{12}-\Omega_{47})$
18,580
Champ = 18,58 x 5 = 92,9 Oe.

D	AT	H	Pcu	Pal
50	61.250	464	3.549	5.429
75	91.875	696	7.987	12.219
100	122.500	928	14.199	21.724
150	183.750	1.392	31.947	48,878
200	245.000	1.856	56.796	86.897
250	306.250	2.420	88.783	135.837
300	367.500	2.784	127.791	195.520

Section 40 x 40 = 1.600 cm2
Long.spire moyenne = 440 cm.
Vol.de conducteur = 503.360 cm3
Poids Cu = 4.480 Kg
Poids Al = 1.359 Kg

Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Cadres A = H
$(\Omega_{12}-\Omega_{62})$: 22,700
Champ = 22,7 x 5 = 113,5 Oe.

D	AT	H	Pcu	Pal
50	80.000	567,5	4.857	7.431
75	120.000	851	10.926	16.721
100	160.000	1.135	19.429	29.728
150	240.000	1.702	43.715	66.883
200	320.000	2.270	77.716	118.905
250	400.000	2.837	121.431	185.789
300	480.000	3.405	174.861	267.537

Tableau n°2 (suite)
(e)

Section 63 x 63 = 3.969 cm2
Long.spire moyenne = 532 cm
Vol.de conducteur = 1.512.192 cm3
Poids Cu = 13.458 Kg
Poids Al = 4.082 Kg

Champ pour D = 1 u.c.g.s.
12 premiers cadres
$(\Omega_{12}-\Omega_{75})$: 41,124
+ 3/5 du 13ème : 42,895
Champ = 42,895x5=214,475 Oe.

D	AT	H	Pcu	Pal
25	99.000	536	3.644	5.440
50	198.000	1.072	14.569	21.750
75	297.000	1.608	32.796	48.960

Section 88 x 88 = 7.744 cm2
Long.spire moyenne = 632 cm
Vol.de conducteur = 3.502.442 cm3
Poids Cu = 31.171 Kg
Poids Al = 9.456 Kg

Champ pour D = 1 u.c.g.s.
Somme des 17 premiers cadres
$(\Omega_{12}-\Omega_{100})$: 64,467
+ 3/5 du 18ème : 1,936
66,403
Champ=66,403x5= 332,015 Oe.

D	AT	H	Pcu	Pal
25	193.600	825	8.750	13.000
50	387.200	1.650	35.000	52.000
75	580.800	2.475	78.750	117.000

A l'aide de ces tableaux, sont établies les courbes de la puissance et du poids de conducteur en fonction du champ , avec la densité moyenne D comme paramètre, cf. graphiques III et IV.

Ces dernières ont permis de tracer la famille des courbes de la puissance et du poids de conducteur en fonction de la densité moyenne pour des valeurs données du champ, et ceci dans le cas du cuivre (graphique V) et de l'aluminium (graphique VI).

Interprétation des graphiques.

Les graphiques V et VI mettent bien en évidence l'existence du minimum de la fonction P = f (D) pour un champ H donné. Ces minima ont lieu pour des valeurs D_o de D très faibles (pour le cuivre D_o est inférieur à 50 A/cm^2 pour un champ de 1250 oersteds. Pour l'aluminium, ces densités optima sont encore plus faibles). De plus, si pour D croissant jusqu'à D_o, la courbe P = f (D) décroit d'abord très rapidement pour $D<D_o$, elle ne croit que très lentement avec D pour $D>D_o$. Par suite, les minima ne sont pas critiques pour $D>D_o$ et on pourra choisir D nettement supérieur à D_o de façon à nécessiter moins de métal pour la construction, tout en n'augmentant pas la puissance dans de grandes proportions.

Par ailleurs, une comparaison des graphiques V et VI montre qu'à champ magnétique et puissance électrique égaux, le poids d'aluminium nécessaire est inférieur à celui du cuivre. Pour cette raison, et également à cause de la différence des prix des deux métaux à l'époque où la construction a été commencée, on a choisi l'aluminium comme conducteur.

Le graphique VI montre que si l'on veut obtenir un champ de 1500 oersteds (soit 750 par bobine), sans dépasser un poids de conducteur de 2000 kg pour les deux bobines, il faut une puissance d'environ 28kW. Cette puissance est à majorer des pertes en ligne, des pertes supplémentaires dues à l'augmentation de la résistivité dans les

zones de pliage et de soudure du fil, et du surcroît de puissance qu'il faudra pour l'obtention de l'uniformité, soit au total une majoration de 6 à 7 kW.

Le groupe convertisseur industriel, dont la puissance se rapproche le plus, possède une puissance nominale de 60 kW, si bien que le point de fonctionnement choisi sur le graphique VI correspond aux caractéristiques suivantes : (par bobine)

Puissance électrique : 25 kW
Poids d'aluminium : 1.000 Kg
Champ produit, environ : 1.000 Oe.

Soit pour les deux bobines : 50 kW, 2.000 Kg d'aluminium pour un champ magnétique d'environ 2.000 Oe.; densité moyenne : 110/Amp/cm^2; donc une densité réelle de 150 Amp/cm^2.

La section droite dans laquelle sera inscrite la section droite définitive, après sa détermination, sera un carré de 40 x 40 cm, (soit 1600 cm^2).

C - UNIFORMITE du CHAMP dans le VOLUME UTILE.

Généralités.

Le calcul du champ magnétique, et de ses variations, produit par des bobines circulaires ou rectangulaires, est un problème connu.

En ce qui concerne le calcul du champ produit par un courant circulaire, Moussa et Bellicard ont indiqué les différents procédés de calcul du champ magnétique (I).

Pour le calcul des petites sections droites, deux méthodes générales ont été utilisées.

Dans la première - utilisée par Maxwell - la correction due à la section droite est faite en utilisant le théorème de Taylor. Le champ étant développé d'après

$$H = H_o + \frac{1}{24}\left(\frac{\alpha^2\delta^2 H_o}{\partial x^2} + \frac{\beta^2\partial^2 H_o}{\partial y^2}\right) + \cdots$$

où H_o est la valeur du champ au point (x,y) dû à un nombre de tours circulaires coïncidents, et H est le champ au même point, dû au même nombre de spires réparties sur une section droite rectangulaire de profondeur axiale α et de largeur radiale β.

Cette méthode est utilisée par Gray, Dwight et Ruark pour les bobines de petite section droite.

La deuxième méthode pour les petites sections droites consiste à intégrer le potentiel scalaire magnétique sur la surface de la bobine (Dwight - Von Zeipel).

Pour les bobines circulaires de grande section droite, Koch (II) a mis au point une autre méthode qui consiste à trouver la distribution du champ dû à une bobine cylindrique 1/2 infinie d'épaisseur nulle (fig.6) et pour une densité d'ampère-tours = 1.

I - A.Moussa et J.Bellicard -J.des Rech.CNRS n°18 -mars 52- pp.131-135.

"Le champ magnétique des bobines circulaires et son application à la spectrographie des rayons β ".

II- Koch - J.of applied Physics-Vol.2n°5-pp.387-398(mai 50)

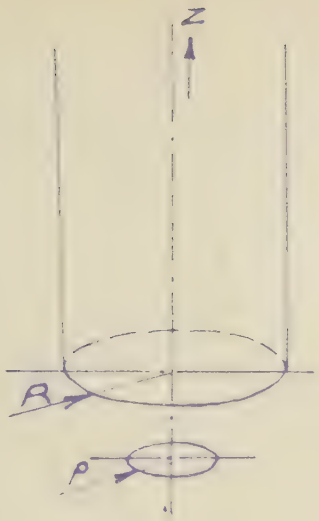


figure 6

figure 7

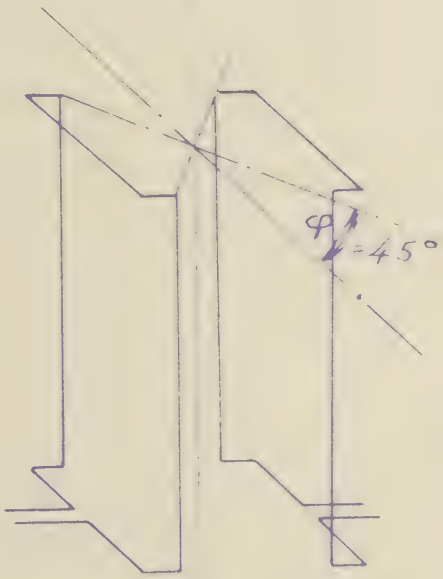


figure 8

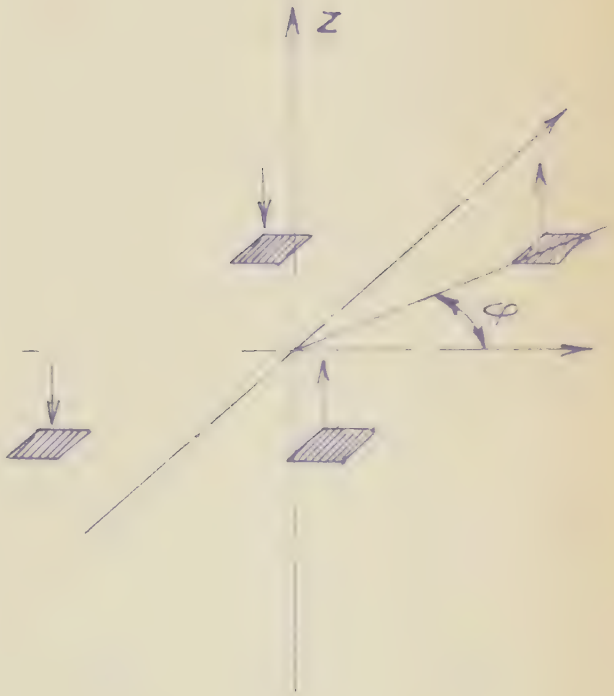


figure 9

Par addition et soustraction de 4 de ces bobines 1/2 infinies, le champ dû à une bobine creuse finie peut être déterminé. Les résultats sont obtenus par des expressions en série. Tout de même, la convergence est raisonnable et permet d'obtenir la distribution des non-uniformités du champ avec une approximation de 0,2°/o dans une grande partie de volume utile.

En ce qui concerne les bobines rectangulaires, Beyerle (III) a proposé un système de bobines courbées (fig.7) en vue de compenser le champ magnétique terrestre le long de l'axe d'un oscillographe cathodique. Dans ses calculs, l'auteur suppose les bobines filiformes.

Harris (IV) a repris les idées de Beyerle et a montré qu'on obtient un champ plus uniforme en prenant des bobines coudées (fig.8).

R.H.Lyddane et A.R.Ruark (V) ont étendu les calculs d'Harris. Les auteurs déterminent le champ produit par 4 faisceaux de fils parallèles et supposés de longueur infinie. La section droite horizontale est donnée par la figure 9. Les auteurs démontrent que le champ près de l'axe Oz peut être rendu plus uniforme en utilisant des faisceaux carrés et en donnant à φ la valeur 30°.

Pour étudier l'influence d'une longueur finie pour une bobine à extrêmités droites, les auteurs sont obligés de supposer les conducteurs filiformes. Ils donnent ensuite l'expression des composantes du champ dû à 4 fils fins infinis, valables pour des bobines très longues et de faible section droite.

Dans l'étude qui suit, le champ magnétique et ses variations seront calculés à partir du potentiel magnétique produit par une spire.

III - Dr.Ing.K.Beyerle: Archiv.Electrotechnik.1931 p.267

IV - FK.Harris: Nat.Bur.Stand.J.Research-t.12 p.87 (1934) et t.13 p.391 (1934)

V - R.H. Lyddane et A.E.Ruark:Rev.Sc.Instr.Sept.39,vol.10 p.25

Potentiel et champ magnétique produits par une spire en un point.

Le potentiel magnétique en un point M étant proportionnel à l'angle solide sous lequel on voit la spire du point M, le calcul du potentiel se ramène à celui de l'angle solide.

Soient O_1 le centre, O_1x_1 et O_1y_1 les axes de symétrie de cette spire, (fig.10) et M le point de l'espace où l'on désire connaître le potentiel magnétique. Désignons par O le pied de la perpendiculaire abaissée de M sur le plan de la spire, OM = z.

La surface de la spire peut être considérée comme composée de 3 rectangles et de 4 quadrants comme le montre la fig.10, et l'angle solide sera la somme des angles solides couvrant chacun soit la surface d'un rectangle, soit la surface d'un quadrant.

En ce qui concerne l'angle solide d'un rectangle, son calcul a déjà été fait (voir page 11).

Calcul de l'angle solide au-dessus d'un quadrant.

Nous ne reprendrons pas ici les différents modes de calcul de l'angle solide au-dessus d'une base circulaire.

Toutefois la forme de notre enroulement nous entraîne dans un problème un peu différent. Seule nous intéresse la valeur de l'angle solide au-dessus d'un quadrant.

Les formules que nous établirons sont celles qui, dans le présent cas, mènent le plus rapidement au résultat.

Les calculs numériques seront limités au strict minimum, tout en ayant soin de garder une précision suffisante.

Pour plus de commodité, nous prendrons des coordonnées cylindriques (fig.11) d'axes O_2z_2 (O_2 étant le centre de courbure de la spire) et comme origine des arguments dans le plan xOy, nous prendrons O_2x_2, parallèle à Ox.

Appelons ω_1 l'angle polaire de OO_2, on a :

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{y_0}{x_0}$$

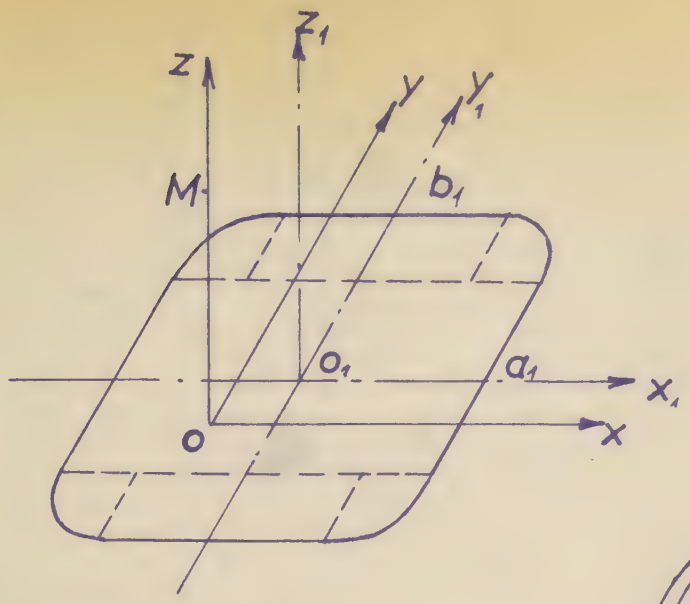


figure 10

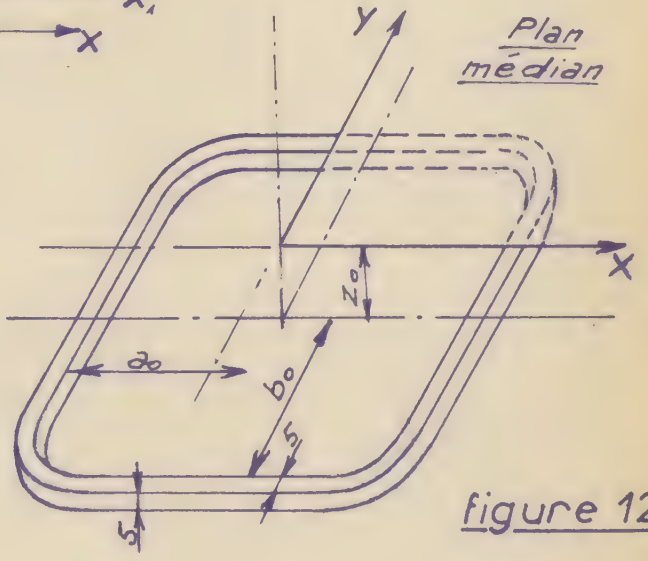


figure 12

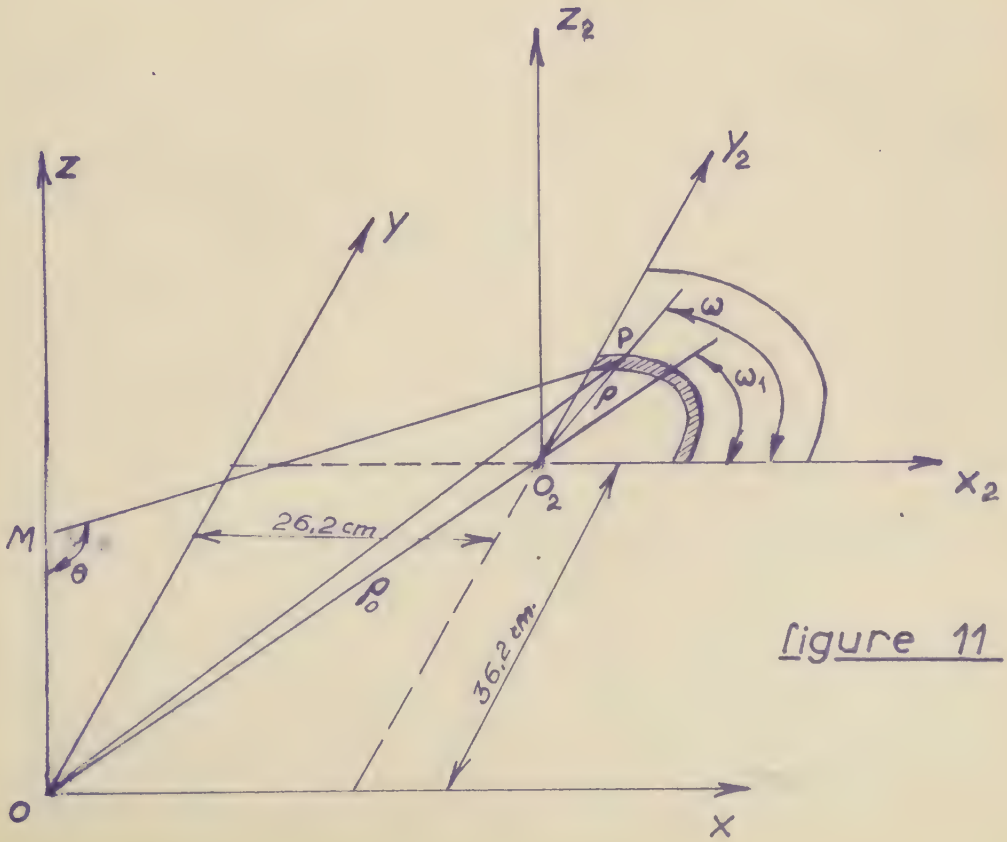


figure 11

Considérons alors un élément de surface en P :

$$ds = \rho \, d\omega \, d\rho \, .$$

L'angle solide sous lequel cet élément est vu du point M est :

$$d\Omega = \frac{\rho \, d\rho \, d\omega \cos\theta}{MP^2} = \frac{z \, \rho \, d\rho \, d\omega}{\left[z^2 + \rho_0^2 + \rho^2 + 2\rho\rho_0 \cos(\omega - \omega_1)\right]^{3/2}}$$

posons $p = z^2 + \rho_0^2 + \rho^2$ et $m = 2\rho\rho_0$, il vient :

$$d\Omega = \frac{z\rho \, d\rho \, d\omega}{\left[p + m\cos(\omega - \omega_1)\right]^{3/2}}$$

Calculons l'angle solide correspondant à un quart d'anneau d'épaisseur radiale $d\rho$; ρ = constante; ω variant de 0 à $\pi/2$.

$$\Omega = \int_0^{\pi/2} \frac{z\rho \, d\rho \, d\omega}{\left[p + m\cos(\omega - \omega_1)\right]^{3/2}} = z\rho \, d\rho \int_0^{\pi/2} \frac{d\omega}{\left[p + m\cos(\omega - \omega_1)\right]^{3/2}}$$

posons maintenant $t = \sqrt{p + m\cos(\omega - \omega_1)}$

avec $\cos(\omega - \omega_1) = \frac{t^2 - p}{m}$; $\sin(\omega - \omega_1) = \sqrt{1 - \left(\frac{t^2 - p}{m}\right)^2}$

$$d\omega = \frac{-2t \, dt}{m\sqrt{1 - \left(\frac{t^2 - p}{m}\right)^2}}$$

il vient :

$$\Omega = -2\rho \, d\rho \, z \int_{\sqrt{p + m\sin\omega_1}}^{\sqrt{p + m\cos\omega_1}} \frac{dt}{t^2\sqrt{m^2 - (t^2 - p)^2}} = 2\rho \, z \, d\rho \, \mathcal{J}$$

Faisons un nouveau changement de variable en posant :

$$m^2 - (t^2 - p)^2 = \left[a^2 - t^2\right]\left[t^2 - b^2\right] \text{ avec } \begin{matrix} p + m = a^2 \\ p - m = b^2 \end{matrix} \quad (a > b)$$

Cette transformation est légitime car on a toujours p>m, par ailleurs :

$$t^2 = z^2 + \rho_0^2 + \rho^2 + 2\rho\rho_0 \cos(\omega - \omega_1)$$

$$a^2 = z^2 + \rho_0^2 + \rho^2 + 2\rho\rho_0$$

$$b^2 = z^2 + \rho_0^2 + \rho^2 - 2\rho\rho_0$$

donc : $b^2 < t^2 < a^2$ et $(a^2 - t^2)(t^2 - b^2)$ sera toujours positif.

En utilisant les notations de Jacobi et en posant : $t = \mathrm{adn}(u)$; u_2 tel que $\mathrm{adn}(u_2) = \sqrt{p + m\cos\omega_1}$

u_1 tel que $\mathrm{adn}(u_1) = \sqrt{p + m\sin\omega_1}$

$k' = \frac{b}{a}$ = module complémentaire = $\sqrt{1 - k^2}$; on a :

$$(a^2 - t^2)(t^2 - b^2) = a^4(dn^2(u) - k'^2) + a^4 dn^2(u)[k'^2 - dn^2(u)]$$

$$= a^4 k^2 cn^2(u)[1 - dn^2(u)]$$

$$= a^4 k^2 sn^2(u)\, cn^2(u)$$

et $\sqrt{(a^2 - t^2)(t^2 - b^2)} = a^2 k^2 sn(u)\, cn(u)$

en plus on a :

$$dt = -a k^2 sn(u)\, cn(u)\, du$$

l'intégrale $J = \int \frac{dt}{t^2\sqrt{(t^2 - b^2)(a^2 - t^2)}}$ devient :

$$J = \int_{u_1}^{u_2} - \frac{du \times a k^2 sn(u) cn(u)}{a^2 dn^2(u) \times a^2 k^2 sn(u) cn(u)} = -\frac{1}{a^3}\int_{u_1}^{u_2} \frac{du}{dn^2(u)}$$

qui est égal à $-\frac{1}{a^3} \times \frac{1}{k'^2}\left[el(u) - \frac{k^2 sn(u) cn(u)}{dn(u)}\right]_{u_1}^{u_2}$

que nous pouvons mettre sous une autre forme. En remplaçant sn(u); cn(u); dn(u) par leurs valeurs, puisqu'on a :

$$\text{adn}\,(u_2) = \sqrt{p + m\cos\omega_1}$$

$$\text{adn}\,(u_1) = \sqrt{p + m\sin\omega_1}$$

et d'une façon générale $\text{sn}\,(u) = \frac{\sqrt{1-\text{dn}^2(u)}}{k^2}$; $\text{cn}(u) = \sqrt{1-\text{sn}^2(u)}$

en posant par ailleurs $\text{sn}(u_1) = \sin\varphi_1$

$\text{sn}(u_2) = \sin\varphi_2$

θ tel que $\sin\theta = k$

el(u) n'est autre chose que $E(k, \varphi) = E(\theta, \varphi)$, intégrale elliptique de deuxième espèce pouvant être lue directement dans les tables de Legendre en fonction de l'argument φ et de l'angle modulaire θ.

Finalement :

$$J = -\frac{1}{p^2 - m^2}\left[\sqrt{p+m}\left[E(k,\varphi_2) - E(k,\varphi_1)\right] - \frac{m\sin\omega_1}{\sqrt{p+m\cos\omega_1}} + \frac{m\cos\omega_1}{\sqrt{p+m\sin\omega_1}}\right]$$

et l'angle solide Ω, au-dessus d'un quart d'anneau d'épaisseur $d\rho$ et de rayon ρ, s'écrit :

$$\Omega = \frac{2\rho\,d\rho\,z}{p^2 - m^2}\left[\sqrt{p+m}\left[E(k,\varphi_2) - E(k,\varphi_1)\right] - \frac{m\sin\omega_1}{\sqrt{p+m\cos\omega_1}} + \frac{m\cos\omega_1}{\sqrt{p+m\sin\omega_1}}\right]$$

Nous désignerons désormais par $\omega(\rho)$ cet angle solide au-dessus d'un quart d'anneau de rayon ρ, et par Ωq celui au-dessus d'un quadrant.

Pour avoir la valeur de Ωq, il suffit d'évaluer

$\Omega q = \int_0^q \omega(\rho)\,d\rho$ intégrale que nous calculerons par la méthode de Simpson.

Appelons ω_0; ω_1; ω_2..... les valeurs de $\omega(\rho)$ correspondant à ρ_0, ρ_1, ρ_2.... et soit $\Delta\rho = \rho_n - \rho_{n-1}$

on aura : $\Omega q = \frac{\Delta\rho}{3}(\omega_0 + 4\omega_1 + 2\omega_2 + 4\omega_3 + \ldots 2\omega_{n-2} + 4\omega_{n-1} + \omega_n)$

$\Delta\rho$ est pris égal à 5 cm. dans les calculs numériques.

Dans le cas où n est petit et que la méthode ne se justifie plus, on prend $\Delta\rho$ = 2 cm. et on utilise la méthode des trapèzes.

Résultats -

Le tableau n°III donne la valeur de l'angle solide sous lequel sont vues les spires des points suivants :

1°) centre (x = o; y = o; z = o)

2°) points sur l'axe Ox : x = 20; y = o; z = o (bord de la chambre) et x = 10; y = o; z = o (milieu entre le centre et le bord).

3°) points analogues sur Oy : x =o, y = 15; z = o et x = o; y = 30; z = o.

4°) Deux autres points dans le plan médian et situés sur la diagonale : x = 10; y = 15; z = o et x=20; y=30; z=o (ce dernier est déjà nettement en dehors du volume utile de la chambre).

5°) Un point sur Oz : x = 0; y = 0; z = 5

Dans ce tableau, les spires sont caractérisées par leur distance z au plan médian et par la lettre s suivie d'un indice :

s_1 pour les spires inscrites dans un rectangle de 1/2 cotés a = 30; b = 40

s_2 " " " " " a = 35; b = 45

s_3 " " " " " a = 40; b = 50

s_9 a = 70; b = 80

Une grande partie des calculs numériques a été effectuée par l'I.B.M. (France).

La précision des valeurs numériques de $\omega(\rho)$ est variable par suite des différences de variations des fonctions elliptiques; en général, l'erreur est de $\pm$0,0001 et peut, dans certains cas, atteindre $\pm$0,0002.

En calculant $\Omega(q)$ par la méthode de Simpson, l'erreur sera inférieure à 0,001 si l'on prend $\Delta\rho$ = 5 cm. (On a constaté qu'en prenant, pour quelques séries, $\Delta\rho$ = 2 cm,

il n'y a guère que la 4ème décimale qui est affectée).

L'erreur sur Ωq sera un peu supérieure lorsqu'on utilise la méthode des trapèzes. Mais comme dans ce cas l'angle solide au-dessus des quadrants est faible par rapport à celui au-dessus des rectangles, la précision est du même ordre de grandeur.

Par exemple, pour le calcul du champ au centre, l'angle solide au-dessus de la plus petite spire (s_1) est $\Omega = 4,3822$ pour z = 12 et la part due aux 4 quadrants est $\Omega q = 0,0048$ soit 0,11°/o. pour z = 52, $\Omega = 1,2368$, $\Omega q = 0,0068$ soit 0,56°/o.

pour la spire s_2: pour z = 12, $\Omega = 4,6077$; $\Omega q = 0,0217$ soit 0,46°/o

pour z = 52, $\Omega = 1,4884$, $\Omega q = 0,0337$ soit 2,25°/o

A partir de s_3 l'intégration a été faite par la méthode de Simpson. Pour la plus grande des spires (s_9) on a

pour z = 12; $\Omega = 5,3416$; $\Omega q = 0,1952$ soit 3,65°/o

pour z = 52; $\Omega = 2,8741$; $\Omega q = 0,4607$ soit 16,38°/o

La part la plus importante due à un seul quadrant est obtenue pour la spire s_9 (la plus grande) en calculant le champ au point x = 20; y = 30; z = 0 et pour le quadrant le plus proche de ce point, dans ce cas, pour z = 12 on a $\Omega = 5,0275$; Ωq dû à ce quadrant = 0,3356 soit 6,67°/o. pour z = 52, $\Omega = 2,6169$; $\Omega q = 0,3091$, soit 11,8%.

Valeurs des angles solides au point x = o y = o z = o Tableau n°IIIa

s \ z	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52	57
s_1	5,1367	4,3822	3,7124	3,1368	2,6532	2,2517	1,9206	1,6477	1,4230	1,2368	1,0816
s_2	5,2807	4,6077	3,9938	3,4498	2,9784	2,5728	2,2301	1,9398	1,6951	1,4864	1,3131
s_3	5,3909	4,7838	4,2202	3,7088	3,2541	2,8544	2,5080	2,2082	1,9508	1,7287	1,5378
s_4	5,4780	4,9256	4,4052	3,9254	3,4907	3,1014	2,7558	2,4535	2,1882	1,9560	1,7534
s_5	5,5488	5,0417	4,5589	4,1081	3,6941	3,3174	2,9792	2,6764	2,4075	2,1699	1,9585
s_6	5,6066	5,1369	4,6875	4,2635	3,8768	3,5074	3,1772	2,8783	2,6093	2,3679	2,1516
s_7	5,6548	5,2175	4,7966	4,3968	4,0224	3,6742	3,3539	3,0608	2,7940	2,5522	2,3325
s_8	5,6955	5,2850	4,8894	4,5114	4,1550	3,8214	3,5116	3,2259	2,9620	2,7232	2,5026
s_9	5,7286	5,3416	4,9660	4,6069	4,2666	3,9464	3,6471	3,3690	3,1116	2,8741	2,6555

Valeurs des angles solides au point x = 10 y = 0 z = 0 Tableau n°IIIb

s \ z	12	17	22	27	32	37	42	47	52
s_1	4,2492	3,5733	3,0094	2,5446	2,1626	1,8496	1,5915	1,3782	1,2013
s_2	4,5187	3,8937	3,3513	2,8880	2,4953	2,1645	1,8857	1,6506	1,4519
s_3	4,7220	4,1470	3,6328	3,1811	2,7883	2,4498	2,1583	1,9080	1,6929
s_4	4,8808	4,3506	3,8663	3,4314	3,0458	2,7059	2,4084	2,1484	1,9218
s_5	5,0078	4,5169	4,0616	3,6460	3,2706	2,9335	2,6361	2,3713	2,1372
s_6	5,1114	4,6547	4,2266	3,8305	3,4681	3,1394	2,8428	2,5767	2,3384
s_7	5,1970	4,7703	4,3667	3,9897	3,6411	3,3217	3,0298	2,7649	2,5251
s_8	5,2689	4,8680	4,4863	4,1278	3,7933	3,4837	3,1986	2,9368	2,6978
s_9	5,3272	4,9480	4,5858	4,2436	3,9226	3,6231	3,3455	3,0887	2,8523

Valeurs des angles solides au point x = 20 y = 0 z = 0 - Tableau n°IIIc

s \ z	12	17	22	27	32	37	42	47	52
s_1	3,7153	3,0851	2,6014	2,2166	1,9037	1,6460	1,4315	1,2524	1,1016
s_2	4,1738	3,5394	3,0267	2,6074	2,2610	1,9715	1,7283	1,5226	1,3478
s_3	4,4916	3,8898	3,3797	2,9486	2,5840	2,2739	2,0096	1,7833	1,5889
s_4	4,7203	4,1613	3,6696	3,2417	2,8711	2,5501	2,2719	2,0309	1,8209
s_5	4,8918	4,3749	3,9079	3,4916	3,1234	2,7990	2,5431	2,2625	2,0416
s_6	5,0262	4,5457	4,1049	3,7047	3,3444	3,0220	2,7340	2,4776	2,2495
s_7	5,1304	4,6846	4,2692	3,8867	3,5375	3,2206	2,9341	2,6761	2,4437
s_8	5,2162	4,7993	4,4075	4,0427	3,7061	3,3972	3,1148	2,8578	2,6243
s_9	5,2843	4,8918	4,5204	4,1724	3,8486	3,5489	3,2725	3,0186	2,7858

Valeurs des angles solides au point x = 0 y = 15 z = 0 - Tableau n°IIId

s \ z	12	17	22	27	32	37	42	47	52
s_1	4,2607	3,5723	2,9950	2,5210	2,1387	1,8204	1,5636	1,3529	1,1789
s_2	4,5208	3,8881	3,3367	2,8665	2,4700	2,1376	1,8994	1,6259	1,4294
s_3	4,7198	4,1387	3,6184	3,1615	2,7656	2,4250	2,1737	1,8844	1,6711
s_4	4,8767	4,3417	3,8526	3,4135	3,0249	2,6835	2,4258	2,1261	1,9008
s_5	5,0030	4,5079	4,0487	3,6296	3,2519	2,9148	2,6554	2,3506	2,1174
s_6	5,1060	4,6458	4,2141	3,8153	3,4508	3,1209	2,8638	2,5576	2,3198
s_7	5,1914	4,7612	4,3544	3,9753	3,6253	3,3045	3,0524	2,7472	2,5080
s_8	5,2626	4,8583	4,4741	4,1137	3,7781	3,4678	3,2223	2,9206	2,6820
s_9	5,3201	4,9369	4,5729	4,2295	3,9075	3,6080	3,3702	3,0734	2,8374

Valeurs des angles solides au point x = 0 y = 30 z = 0 - Tableau n°IIIe

s \ z	12	17	22	27	32	37	42	47	52
s_1	3,5824	2,9258	2,4331	2,0521	1,7508	1,5087	1,3112	1,1484	1,0126
s_2	4,0650	3,4060	2,8799	2,4598	2,1185	1,8397	1,6091	1,4172	1,2555
s_3	4,4015	3,7763	3,2526	2,8169	2,4540	2,1505	1,8952	1,6795	1,4961
s_4	4,6440	4,0645	3,5596	3,1251	2,7539	2,4363	2,1645	1,9312	1,7302
s_5	4,8255	4,2903	3,8116	3,3869	3,0185	2,6956	2,4141	2,1689	1,9546
s_6	4,9645	4,4700	4,0191	3,6130	3,2505	2,9284	2,6428	2,3907	2,1677
s_7	5,0739	4,6146	4,1908	3,8038	3,4527	3,1358	2,8509	2,5957	2,3674
s_8	5,1611	4,7333	4,3339	3,9660	3,6283	3,3198	3,0385	2,7842	2,5535
s_9	5,2281	4,8244	4,4476	4,0984	3,7749	3,4764	3,2018	2,9502	2,7199

Valeurs des angles solides au point x = 10 y = 15 z = 0 - Tableau n°IIIf

s \ z	12	17	22	27	32	37	42	47	52
s_1	4,1276	3,4340	2,8698	2,4149	2,0450	1,7512	1,5089	1,3096	1,1446
s_2	4,4284	3,7857	3,2375	2,7770	2,3931	2,0741	1,8061	1,5824	1,3955
s_3	4,6529	4,0637	3,5399	3,0872	2,6987	2,3669	2,0837	1,8422	1,6357
s_4	4,8259	4,2818	3,7897	3,3522	2,9675	2,6319	2,3400	2,0866	1,8666
s_5	4,9629	4,4599	3,9971	3,5785	3,2033	2,8694	2,5742	2,3140	2,0851
s_6	5,0729	4,6061	4,1717	3,7724	3,4093	3,0815	2,7883	2,5243	2,2899
s_7	5,1628	4,7272	4,3184	3,9388	3,5891	3,2702	2,9820	2,7181	2,4805
s_8	5,2375	4,8285	4,4425	4,0822	3,7472	3,4384	3,1547	2,8939	2,6572
s_9	5,2966	4,9099	4,5446	4,2013	3,8803	3,5815	3,3049	3,0495	2,8149

Valeurs des angles solides au point x = 20 y = 30 z = 0 - Tableau n°IIIg

s \ z	12	17	22	27	32	37	42	47	52
s_1	3,0487	2,4380	2,0233	1,7206	1,4870	1,2998	1,1457	1,0167	0,9072
s_2	3,6879	3,0187	2,5264	2,1535	1,8630	1,6293	1,4371	1,2765	1,1404
s_3	4,1260	3,4771	2,9610	2,5503	2,2197	1,9497	1,7256	1,5371	1,3768
s_4	4,4277	3,8288	3,3223	2,8993	2,5468	2,2517	2,0036	1,7922	1,6112
s_5	4,6395	4,0960	3,6166	3,1993	2,8396	2,5304	2,2659	2,0375	1,8395
s_6	4,7913	4,2998	3,8542	3,4531	3,0971	2,7948	2,5095	2,2694	2,0589
s_7	4,9024	4,4559	4,0450	3,6661	3,3209	3,0089	2,7276	2,4857	2,2630
s_8	4,9745	4,5773	4,1997	3,8449	3,5146	3,2098	2,9311	2,6861	2,4618
s_9	5,0275	4,6653	4,3160	3,9849	3,6722	3,3819	3,0801	2,8424	2,6169

CHAMP MAGNETIQUE dans le VOLUME UTILE pour des BOBINES de SECTION DROITE 40 x 40 cm.

A l'aide du tableau précédent, il est possible de calculer le champ (H) au centre et aux points pour lesquels on a calculé les angles solides.

En posant $k_n = \Omega\left[s_n, (z = 12)\right] - \Omega\left[s_n, (z = 52)\right]$ on voit que le champ produit par la bobine élémentaire dont les dimensions radiales sont celles de la spire sn et de longueur axiale allant de z = 12 à z = 52 est donné par $h_n = \Delta x \frac{D}{10} k_n$ Pour deux bobines de section 40 x 40 cm, distantes de 12 cm du plan médian, on a :

$$H = \frac{2D}{10} \times \frac{\Delta x}{3}\left[k_1 + 4k_2 + 2k_3 + 4k_4 + 2k_5 + 4k_6 + 2k_7 + 4k_8 + k_9\right]$$

Les résultats obtenus sont les suivants (pour D=110 A/cm^2 et $\Delta x = 5$ cm)

Tableau n°IV

Point du volume utile	Composante axiale du champ en Oersteds	Comparaison avec le champ au centre
x = 0 y = 0 z = 0	2.510	
x = 0 y = 0 z = 5	2.513	+ 0,1%
x = 10 y = 00 z = 0	2.518	+ 0,3%
x = 20 y = 0 z = 0	2.433	- 3%
x = 0 y = 15 z = 0	2.513	+ 0,1%
x = 0 y = 30 z = 0	2.440	- 3%
x = 10 y = 15 z = 0	2.496	- 0,6%
x = 20 y = 30 z = 0	2.323	- 8%

On voit que l'uniformité est loin d'être celle désirée ($\pm$ 1%).

Etudions alors les variations du champ (d'un point à l'autre du plan médian), produites par des éléments de la bobine (l'un des éléments est schématisé sur la figure 12) de section 5 cm x 5 cm, compris entre 2 plans z_o et $z_o + 5$ et entre 2 spires Sn et Sn_{-1}.

(sn_{-1} et sn étant les spires inscrites dans les rectangles $2\,a_o \times 2\,b_o$ et $2\,(a_o+5) \times 2\,(b_o+5)$ respectivement.

Le champ produit par ces éléments est donné par :

$$h = \frac{D}{10} \times 5 \left[\frac{\Omega(s_{n-1}\, z_o) - \Omega(s_{n-1},\, z_o+5) + \Omega(s_n, z_o) - \Omega(s_n, z_o+5)}{2} \right]$$

Représentons (fig.13) le plan médian où l'on a tracé en trait plein les limites de la chambre et en pointillé les limites du volume utile. Ox, Oy sont les axes, et Od une diagonale de la chambre.

Par ailleurs, représentons (fig.14) une section droite de la bobine.

Si l'on calcule le champ produit par une bobine élémentaire (définie ci-dessus), en un point M, qui, partant de O, parcourt par exemple l'axe Ox, on constate que pour certaines bobines élémentaires, ce champ croît de O jusqu'à x = 20; pour d'autres, il décroît; pour certaines bobines enfin ce champ croît, passe par un maximum situé entre x=o et x = 20, puis décroît.

Les mêmes variations se reproduisent quand M décrit Oy ou Od (fig. 13).

On a reproduit (graphique VII) quelques exemples types en représentant la valeur de h en fonction de la distance au centre du point M qui se déplace soit sur Ox (courbe x) soit sur Oy (courbe y) soit sur Od (courbe d).

Les graphiques reproduits correspondent aux bobines élémentaires suivantes (elles ont leur section hachurée sur la fig.14):

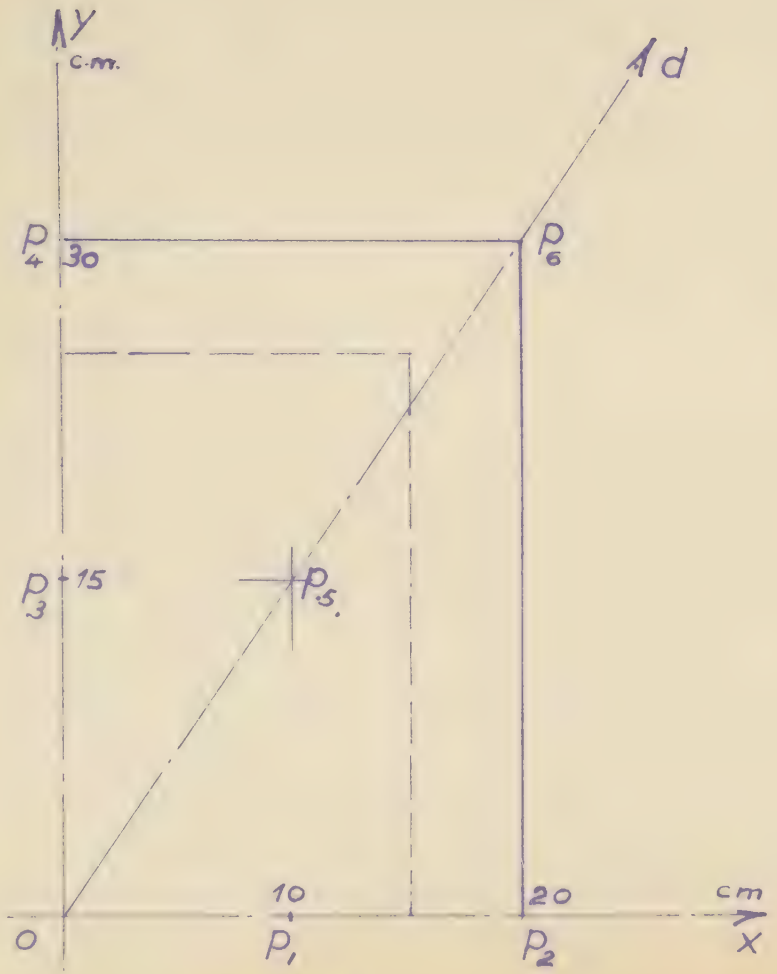


figure 13

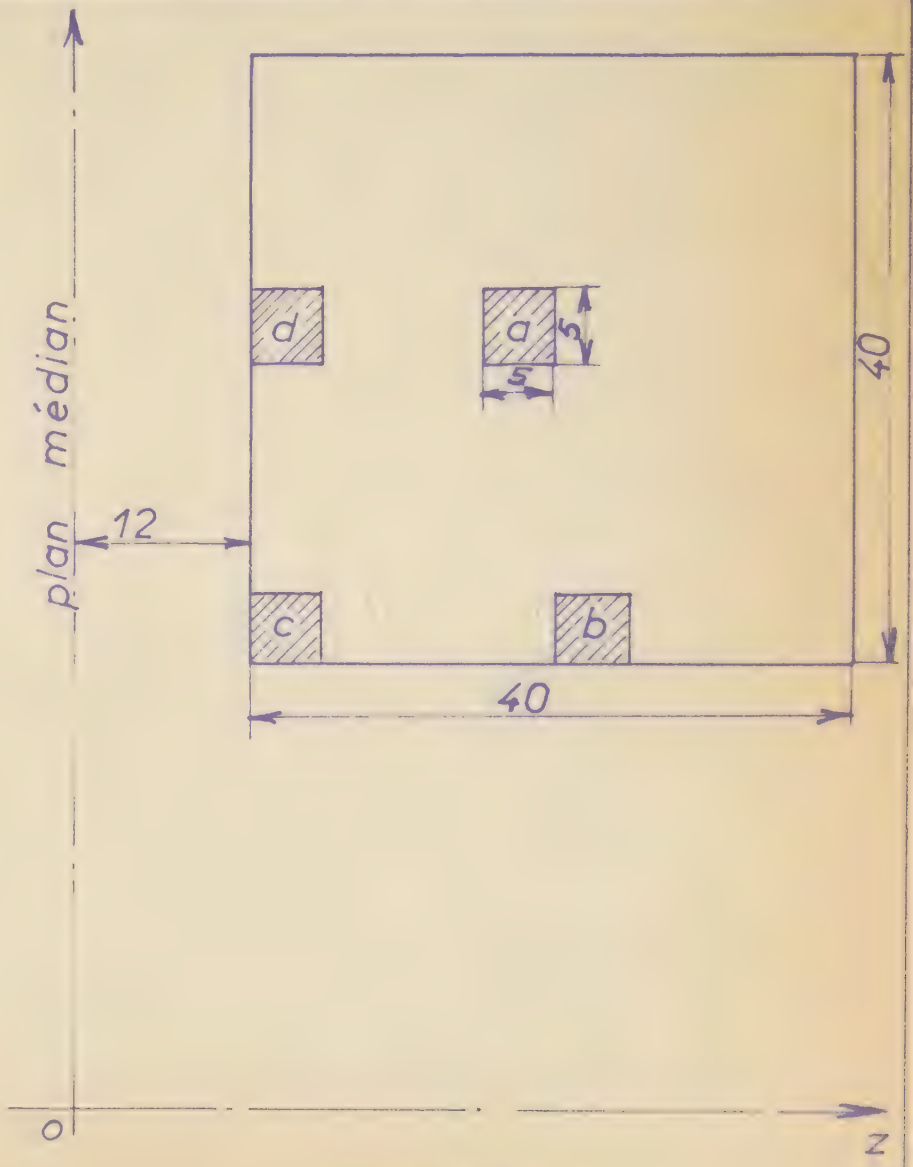


figure 14

les cotes sont en cm.

caract. de la bobine \ figure →	a	b	c	d
Sn	S_6	S_2	S_2	S_6
Sn-1	S_5	S_1	S_1	S_5
z_o	27	12	32	12
$z_o + 5$	32	17	37	17

Dans le cas a : le champ est à peu près constant

Dans le cas b : le champ présente un maximum au centre et décroît très rapidement quand M s'en éloigne.

Dans le cas c : le champ croît, passe par un maximum situé dans le volume utile et décroît ensuite.

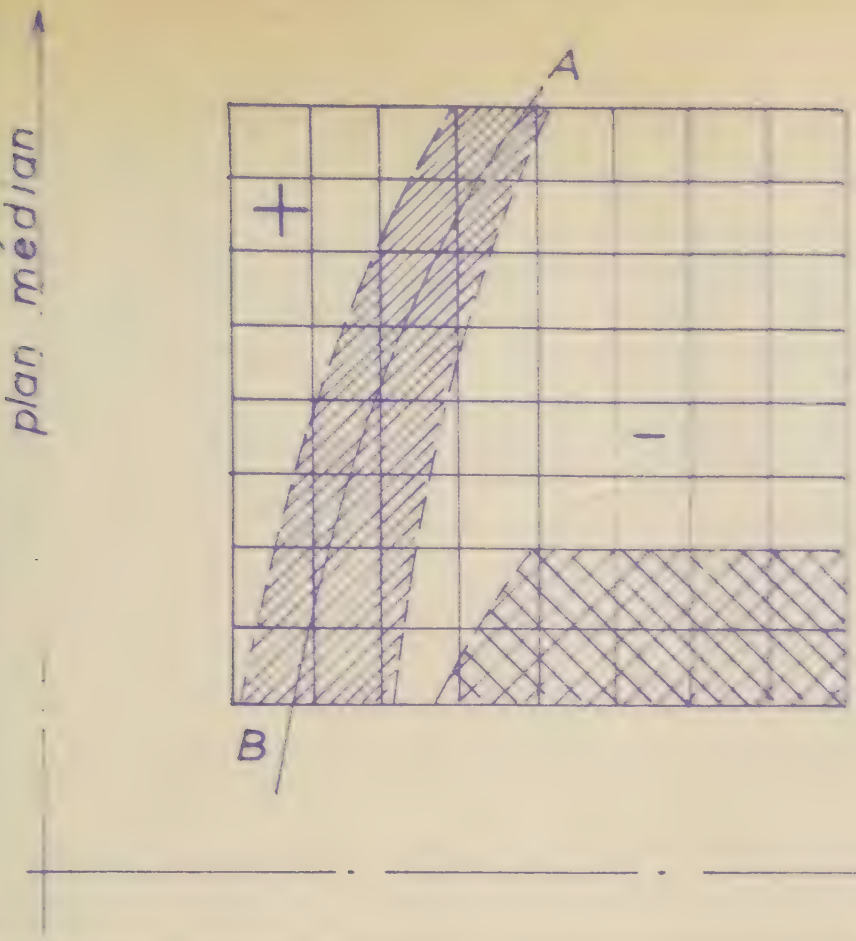
Dans le cas d : le maximum est en dehors du volume utile et le champ croît de x = 0 à x = 20.

Nous faisons cette étude pour toutes les bobines élémentaires puis nous comparons les champs produits au centre et en un point arbitraire P (x = 10; y = 0; z = 0) par exemple.

Reprenons le dessin de la section droite en y représentant toutes les bobines élémentaires (fig.15). Quand le champ produit par ces dernières en P est supérieur à celui produit au centre O, leur section sera affectée du signe +, et si le champ en P est inférieur à celui en O, leur section sera affectée du signe -.

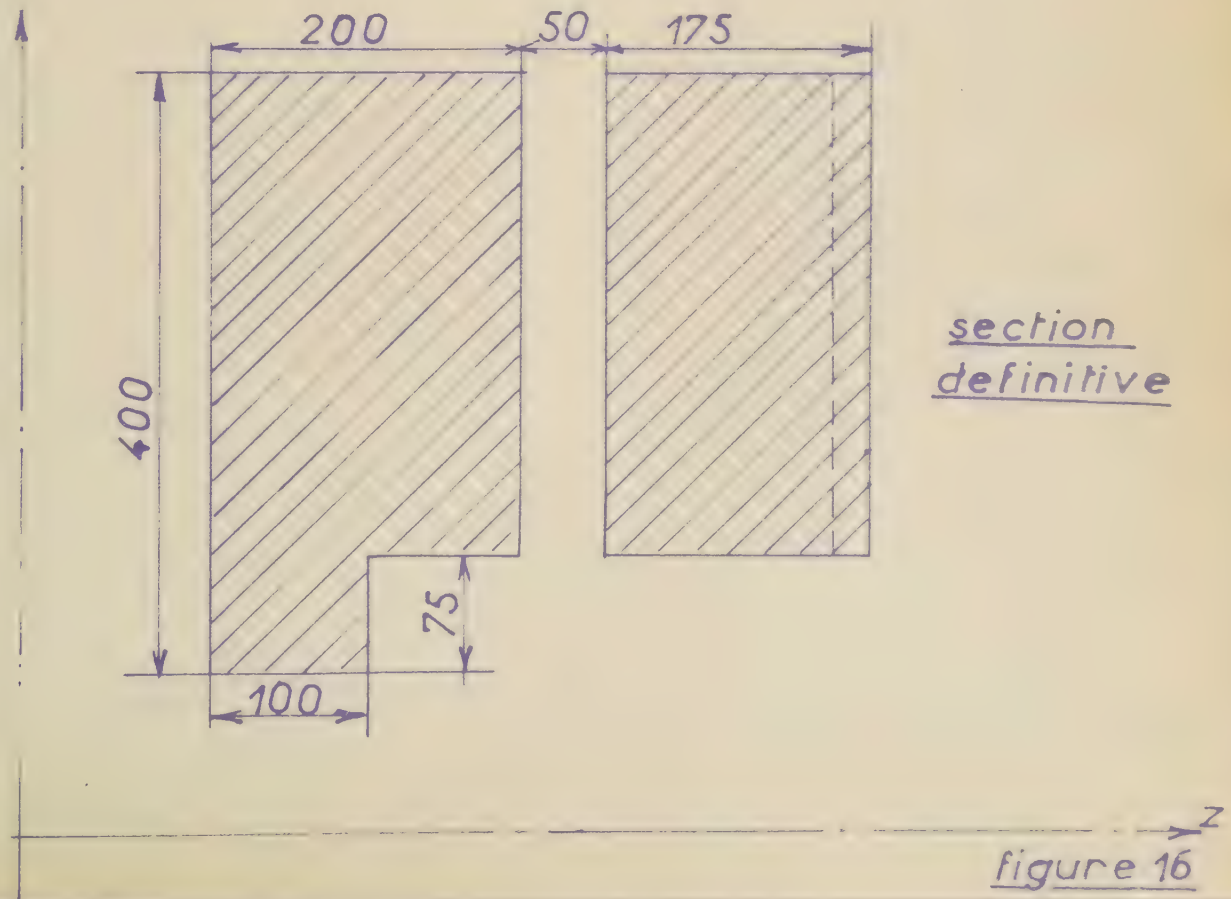
Le résultat est le suivant :

Le plan de la section est séparé en deux régions par une ligne A.B. Les bobines élémentaires dont les sections sont situées à gauche de AB (du côté du plan médian) produisent un champ plus intense en P qu'en O, tandis que pour celles situées à droite de AB, le champ obtenu en P est plus faible qu'en O. Les sections des bobines situées sur AB produisent des champs égaux en P et en O.



section : 40×40
éléments de
5×5 cm.

figure 15



section
definitive

figure 16

Il existe donc une surface S, d'axe Oz, telle que les spires situées sur S produisent en P et en O le même champ.

Comparons maintenant les champs produits par ces mêmes éléments aux deux points O et P' (P' différent de P) : On obtient une surface S' distincte de S.

Cependant, pour les points étudiés P, (x = 10, y = 0; z = 0), P_2(x = 20; y = 0; z = 0), P_3(x = 0; y = 15; z = 0), P_4(x = 0; y = 30; z = 0), P_5(x = 10; y = 15; z = 0), P_6(x = 20; y = 30; z = 0), ces surfaces S sont très voisines.

Il en est de même de leurs traces sur le plan de la section. Sur la figure 15, on n'a représenté qu'une seule ligne AB, moyenne des lignes A_1B_1; A_2B_2.... correspondant respectivement aux points P_1, P_2.... et se plaçant d'ailleurs toutes dans la zone ombrée autour de A.B.

Il est alors évident que l'uniformité est obtenue lorsque les variations du champ produites par les spires affectées du signe + équilibrent celles produites par les spires de signe -.

Mais comme la ligne A.B. n'est qu'une moyenne pour tous les points du volume utile, et que par ailleurs les variations du champ produites par une même spire en différents points du volume utile sont plus ou moins prononcées, il est impossible d'obtenir dans le volume utile une uniformité rigoureuse.

Tout de même, il est possible de limiter les variations du champ dans ce volume en faisant une répartition convenable des spires autour de AB.

Le tableau n°4 montre que le champ est maximum au centre, par suite les spires dont l'influence est prépondérante sur les variations du champ dans le plan médian sont les spires affectées du signe -.

Pour obtenir une meilleure uniformité, nous supprimons donc à droite de AB, les spires causant les plus

grandes variations : ce sont celles représentées par la zone hachurée de la fig.15.

Section droite définitive.

La section droite définitive est schématisée sur la fig.16. On voit que chaque bobine a été divisée en deux demi-bobines. La subdivision a été faite essentiellement pour des raisons de construction. Elle permet une plus grande facilité de montage et de manutention des bobines et se justifie par le fait que les spires enlevées sont parmi celles affectées du signe -.

En outre, cette subdivision permet de travailler avec seulement les premières demi-bobines (en déconnectant les deuxièmes) dont les caractéristiques sont intéressantes pour des expériences nécessitant un champ plus faible (comme par exemple des mises au point de la chambre, etc...). Avec une densité moyenne D = 110 Amp/cm2, elles produisent dans le volume utile un champ de 1330 Oersteds (l'uniformité en est de $\pm$ 3°/o) en consommant seulement 27 kW.

Pour améliorer l'uniformité, on a de plus enlevé un certain nombre de spires (zone hachurée fig.15).

Par contre, dans le sens axial, d'autres ont été ajoutées en vue de maintenir à peu près les caractéristiques électriques données au chapitre précédent et d'utiliser au maximum la puissance du groupe convertisseur. Leur contribution aux variations du champ est faible.

Le tableau suivant donne la valeur de la composante axiale du champ en différents points.

Tableau n° V

Point	Champ en oersteds	Comparaison avec le champ au centre
x = 0 y = 0 z = 0	1957 ± 2	
x = 0 y = 0 z = 5	1954 "	- 0,1 %
x = 10 y = 0 z = 0	1955 "	- 0,1 %
x = 20 y = 0 z = 0	1942 "	- 0,8 %
x = 0 y = 15 z = 0	1962 "	+ 0,3 %
x = 0 y = 30 z = 0	1949 "	- 0,4 %
x = 10 y = 15 z = 0	1961 "	+ 0,2 %
x = 20 y = 30 z = 0	1918 "	- 2,0 %

Il n'y a guère que le champ au point x = 20, y = 30 z = 0 qui ne satisfait pas à l'uniformité désirée (± 1 %) mais on voit (fig.13) qu'il est nettement en dehors du volume utile.

Remarque.

Dans une lettre publiée par Thomson (VI) dans la Physical Review, l'auteur décrit sommairement un système : bobines, chambre, compteurs. L'enroulement constitue des bobines classiques d'Helmholtz qui présentent une section droite analogue à celle que nous adoptons, mais aucune précision n'est donnée par l'auteur à ce sujet.

Remarque II.

L'uniformité que nous obtenons paraît moins bonne que celle du champ magnétique produit par les bobines, construites par M. NAGEOTTE et qui fonctionnent au Laboratoire du CNRS de l'Aiguille du Midi.

Pour ces dernières, l'uniformité est obtenue en courbant les grands côtés des bobines qui sont rectangulaires,

(VI) THOMSON - Cloud chamber study
Physical Rev. Vol.74-n°4 août 48 p.490

M. NAGEOTTE indique une uniformité de 1/1000. Il précise dans sa note (VII), qu'une uniformité de cet ordre est précaire parce qu'une déformation de 1/2 m/m d'une bobine provoque une variation du champ de 1/100 dans la région où elle se produit.

On voit que l'uniformité du champ de nos bobines est du même ordre (voir tableau ci-dessus) et que l'on ne peut guère espérer davantage ne serait-ce qu'à cause des difficultés de construire un ensemble de cette importance avec une plus grande précision.

Par contre, nos bobines ont l'avantage de produire un même champ, avec une même puissance, dans un volume utile deux fois plus grand et nous verrons plus loin que les vérifications expérimentales que nous avons faites nous permettent de garantir très largement une uniformité de 1%.

D - EFFORTS ELECTRO-MAGNETIQUES.

Une grande précision n'est pas nécessaire, il suffira de connaître leur ordre de grandeur.

1°) Efforts d'attraction des bobines.

Nous admettrons que dans le creux axial des bobines, le champ est constant sur un même plan perpendiculaire à l'axe des bobines, et supposerons les spires rectangulaires.

Nous commettrons de cette façon une erreur, difficile à évaluer et que nous estimons à 10 %.

Divisons l'une des bobines (la bobine II par exemple) (voir graphique VIII), en bobines élémentaires de mêmes dimensions radiales mais de longueur axiale dz. Si D est la densité moyenne de courant en Amp/cm^2, le nombre d'AT

(VII) NAGEOTTE - Comptes-Rendus 1945 - tome 22 - page 557

circulant dans un tel anneau sera 40 D dz (40 étant, en cm, l'épaisseur radiale des bobines).

Désignons par S la surface moyenne (moyenne arithmétique entre la surface de la spire intérieure et la surface de la spire extérieure) ($S = 13.600\ cm^2$).

La puissance du feuillet magnétique équivalent à une bobine élémentaire sera $\frac{40\ D}{10}\ dz$ (en u.e.m.) et le flux envoyé par la bobine I à travers une bobine élémentaire sera : SHz en appelant Hz la composante suivant l'axe du champ produit à une distance z de la première bobine.

Le coefficient d'induction mutuelle pour une couronne élémentaire sera donc : $m = \frac{10\ S\ H}{NI}$; NI = nombre d'AT sur la bobine I.

L'effort d'attraction électro-magnétique sera donné par :

$$f = \frac{NI}{10}\left[40\,\frac{Ddz}{10}\right]\frac{\partial M}{\partial z} = \frac{NI}{10} \times \frac{40\ Ddz}{10} \times \frac{10}{NI} \times \frac{S\,\partial\ Hz}{\partial z}$$

$$= 4\ D\ dz\ S\ \frac{Hz}{\delta z}$$

et l'effort total sera :

$$\int_{z_o}^{z_o+e} 4\ D\ S\ \frac{\partial\ Hz}{\partial z} \times dz = 4\ D\ S(H)_{z_o}^{z_o+\ e}$$

zo et zo + e étant les distances à la première bobine des faces terminales de la bobine II. (e = 40 cm; z_o = 24 cm; z_o + e = 64 cm).

Nous obtenons H_z facilement de la façon suivante : il suffit de reprendre le graphique II, de tracer (graphique VIII) la courbe $\mathcal{E}$ dont chaque ordonnée est égale à la somme des ordonnées correspondantes (à une même abscisse) des courbes A, B, C, D, E, F, G et H.

Le champ produit par la bobine I à une distance sur son axe sera donné par $(\mathcal{E}_z - \mathcal{E}_{z+e}) \times \frac{5 \times D}{10}$ (voir calcul page 11) .

La courbe T du graphique VIII représente la valeur de $(\mathcal{E}_z - \mathcal{E}_{z+e}) \times \frac{5\,D}{10}$ en fonction de z avec D = 110 Amp/cm^2 et e = 40 cm.

Pour un entrefer z_o = 24 cm, on trouve alors un effort d'attraction égal à 350 Kg.

Effort d'extension des spires.

Chaque bobine constituant un circuit fermé, considérons un élément de ce circuit, (de section 40 x 40 cm et de longueur égale à l'unité). Les différents conducteurs logés dans cette même section droite s'attirent réciproquement, tendant ainsi à rétrécir la section droite.

Cet élément est soumis, de la part du reste du circuit et de la deuxième bobine, à un effort dirigé de façon à augmenter la surface des spires.

Supposons qu'avec un régime forcé des bobines la composante axiale du champ puisse éventuellement atteindre, dans le voisinage de l'élément considéré, une valeur de 2.000 Oe. L'effort par unité de longueur sur cet élément sera alors $\frac{NI}{10}$ x H soit 150.000 x 2.000 dynes soit environ 30 Kg.

Coefficient de self - induction et d'induction mutuelle.

Leur détermination, si l'on désire les connaître avec exactitude, est difficile. Leurs valeurs ne présentent pas un intérêt justifiant ce calcul pratiquement impossible. Leurs ordres de grandeur sont les suivants :

M = 550 x 10^{-9} henrys.

L = 900 x 10^{-9} henrys. (à 15 % près).

Chapitre II

CONSTRUCTION et MONTAGE des BOBINES

1°) GENERALITES -

En vue du refroidissement, nous avons choisi une circulation d'huile. La puissance électrique nécessaire pour assurer la circulation (1,2 kW) est bien inférieure à celle qu'il faudrait pour un refroidissement par courant d'air (12 à 15 kW). Citons à titre d'indication l'ensemble construit par M.NAGEOTTE pour l'Aiguille du Midi, dont les ventilateurs exigent 1/6 de la puissance consommée dans les enroulements.(Le mode de refroidissement de cette bobine a été récemment modifié, - communication verbale).

L'huile longe les parois des cuves en regard de la chambre avant de traverser le bobinage, pour être recueillie, après son échauffement sur le côté opposé. De cette façon, les flasques au voisinage du volume utile étant constamment en contact avec l'huile fraiche, le gradient de température dans ce volume n'est presque pas fonction de l'échauffement des bobines, tandis qu'avec un refroidissement par l'air, il aurait été pratiquement impossible de réaliser, dans la chambre, un gradient ne dépassant pas 0,5°C.

Pour les différents procédés de refroidissement et leur efficacité, se reporter à l'article de MM.GAUME et TSAI (VIII).

2°) CONDUCTEUR -

La section du conducteur est de 3,35 cm^2 (pour obtenir une densité de 150 Amp/cm^2 avec un débit de 500 Amp.).

Le souci de réduire au maximum le coefficient de foisonnement en respectant la forme de la section droite

---

(VIII) F;GAUME et TSAI - Refroidissements des enroulements d'électro-aimants et de bobines sans fer.
J.de Rech. du C.N.R.S. n° 3 et n° 7.

et sans créer des difficultés particulières d'exécution du bobinage, nous a fait choisir une section rectangulaire de 23,5 x 14,25 m/m.

Les caractéristiques du conducteur sont les suivantes :

Nature du métal : aluminium A5 recuit
Résistivité : 2,78 microhms x cm^2/cm
Section : 23,5 x 14,25 m/m ($\pm$ 1 %) - angles arrondis (rayon de courbure : 2 m/m)

3°) ENROULEMENT -

L'enroulement est exécuté de la façon suivante : le conducteur est d'abord enroulé sur gabarit en spirale plate et les galettes ainsi obtenues sont mises en série par soudage autogène au chalumeau oxyacétylénique, qui ne modifie pas la résistivité (constatation faite après essais).

La mise en série des spires d'une même galette s'effectue dans la partie rectiligne comme le montre la fig. 17.

4°) CALAGE et ISOLEMENT -

Dans le sens radial, aussi bien que dans le sens axial, deux conducteurs adjacents sont maintenus écartés par des cales. La façon même d'exécuter l'enroulement implique le mode d'enchevêtrement de ces dernières. En effet, le conducteur étant d'abord enroulé en spirale plate, les dimensions d'une même spire peuvent varier légérement d'une galette à l'autre, tandis que la planitude des galettes est obtenue facilement. Il est donc évident que les cales parallèles à l'axe des bobines, (cales axiales ou tangentielles) aient une longueur égale à l'épaisseur des galettes, tandis que les cales radiales peuvent avoir une longueur allant des spires intérieures aux spires extérieures de l'enroulement. Pour maintenir le système de calage en place, les cales radiales, placées

galette à 22 spires

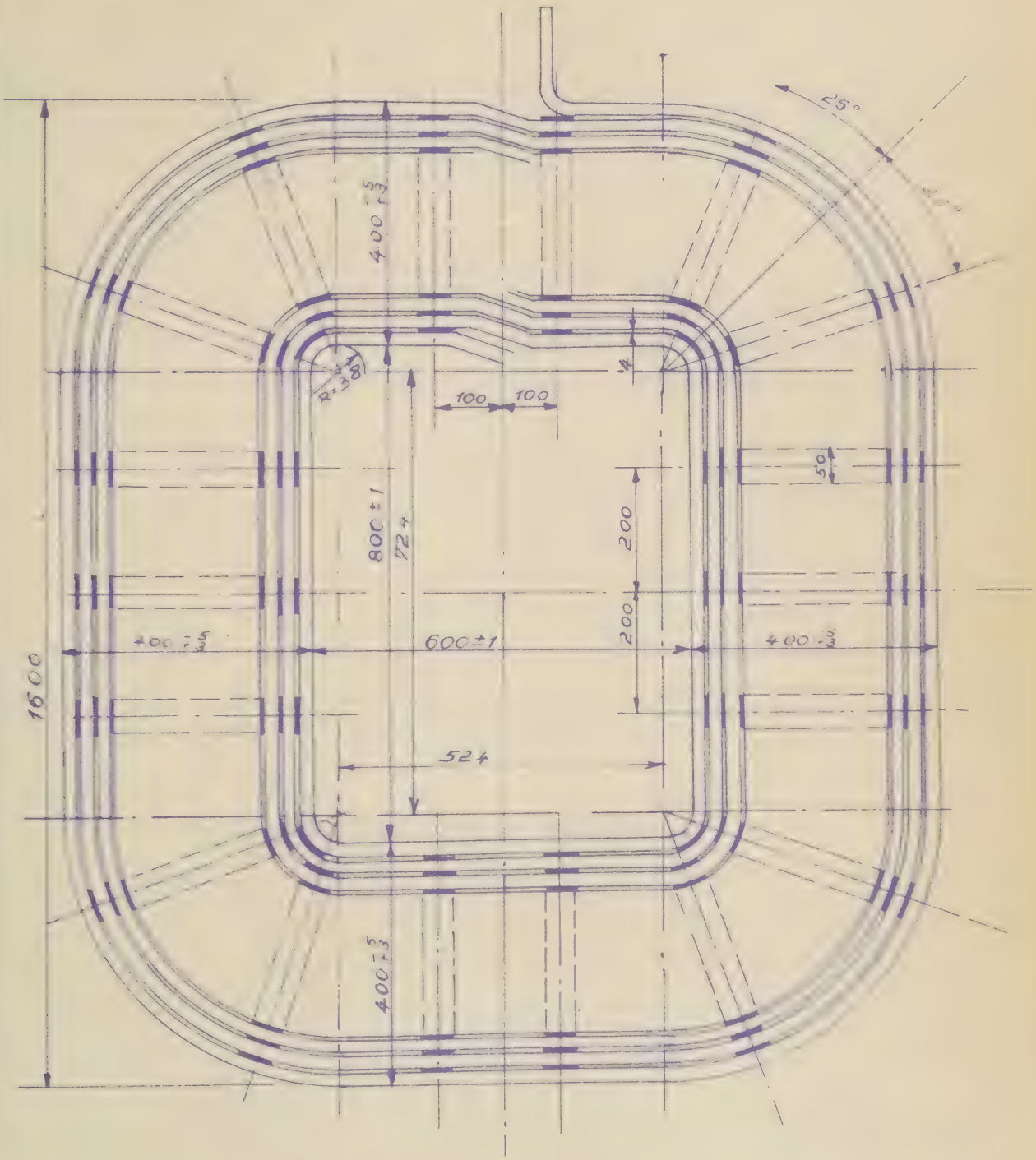


figure 17

aux extrémités de l'enroulement sont encastrées dans les plateaux de bridage.

Dans le sens radial, les conducteurs sont espacés de 4 m/m pour permettre la circulation de l'huile parallélement à l'axe des bobines. Par contre les conducteurs adjacents axialement ne sont maintenus écartés que par des cales de 1 m/m d'épaisseur.

Isolement de sécurité.

Etant donné que chaque conducteur est isolé de ses voisins par des cales en bakélite, un revêtement du fil ne serait pas nécessaire. Toutefois, pour parer à des court-circuits accidentels nous envisageons un revêtement du métal.

Dans ce but, une oxydation anodique de l'aluminium (IX et X) serait indiquée, vu la faible épaisseur et la bonne conductibilité thermique de la couche isolatrice.

Cependant, cette solution a dû être abandonnée car une oxydation continue (la seule intéressante) ne peut être réalisée que pour des bandes d'aluminium d'épaisseur inférieure à 3 m/m. C'est pourquoi nous avons adopté une imprégnation de l'enroulement au vernis résistant à l'huile chaude.

5°) ENCOMBREMENT des ENROULEMENTS -

Nombre de tours :

La première demi-bobine comporte 4 galettes à 22 spires et 4 galettes à 18 spires. Dans la deuxième demi-bobine nous avons 7 galettes à 18 spires. Le nombre de spires est donc de 572.

IX - J.Odier -L'isolement des conducteurs en aluminium Rev. de l'Aluminium n° 136

X - Les conducteurs en aluminium oxydés anodiquement - "L'électricien" Ier et 15 mai 1950

Encombrement dans le sens radial.

a) galette à 22 spires : les dimensions de la spire intérieure sont de 600 x 800 m/m. L'encombrement radial des 22 conducteurs, compte tenu de l'isolement et du foisonnement de montage, est de 400 $\pm$ 1 m/m. Les dimensions extérieures de la 22ème spire sont donc de 1.400 x 1.600 $\pm$ 2mm

b) galette à 18 spires : dimensions de la spire intérieure : 746 x 946 m/m. L'encombrement radial des 18 conducteurs étant de 327 $\pm$ 1 m/m, les dimensions des spires extérieures sont les mêmes que pour les galettes à 22 spires.

Encombrement dans le sens axial.

Compte tenu du foisonnement de montage et de l'isolement, la longueur axiale occupée par les 8 galettes de la première demi-bobine est de 200 $\pm$ 1,5 m/m et celle occupée par les 7 galettes de la deuxième demi-bobine est de 174 $\pm$ 1 m/m.

La longueur développée d'une galette à 22 spires est de 87,56 mètres, celle d'une galette à 18 spires est de 75,83 mètres.

Le poids total de conducteur utilisé pour les deux bobines est de 2.150 Kg.

6°) CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES du BOBINAGE -

Ampère-tours :

Le nombre de spires étant de 572, et l'intensité du courant de 500 amp., le nombre d'ampère-tours est de 286.000 en régime normal.

Coefficient de foisonnement.

Le coefficient de foisonnement de l'enroulement proprement dit (sans les plateaux de bridage) est égal à 1,37.

Résistance électrique.

La résistivité de l'aluminium A5 est de 2,78 microhms x cm^2/cm à 20° C. Nous supposerons que la température atteinte en des points mal refroidis est au maximum de 60°C.

A cette température, la résistivité serait de 3,22 microhms x cm^2/cm.

La longueur totale du conducteur étant de 2.380 mètres, la résistance électrique serait donc de 0,228 ohms.

Tension aux bornes.

Elle est de 0,228 x 500 = 114 volts. La puissance dissipée sera donc de 114 x 500 = 57.000 watts ou 57 kW en régime normal.

Comme autres caractéristiques du bobinage, rappelons les valeurs approximatives du coefficient de self-induction: $L = 900 \times 10^{-9}$ henrys, et du coefficient d'induction mutuelle :

$M = 550 \times 10^{-9}$ henrys.

7°) BRIDAGE par DEMI-BOBINE -

Pour le bridage et le calage des bobines dans les cuves, se reporter au plan de montage (fig.18 à 23). Les figures 18 et 19 représentent à l'échelle 1/2, une coupe (au-dessus de l'axe) des bobines. Les figures 20 et 21 donnent des indications supplémentaires concernant les bornes de sortie.

La figure 22 schématise 1/4 de l'enroulement, bridé, (sans cuves) vu du côté opposé à la chambre, dans le sens de l'axe. Ce même ensemble, vu de gauche est représenté en figure 23.

Chaque demi-bobine est bridée individuellement avant d'être introduite dans sa cuve.

Dans le sens axial, les galettes sont serrées entre deux plateaux d'épaisseur 25 m/m, coulés en 2AS 13, et usinés sur les deux faces. Chaque plateau est constitué en réalité, comme le montre la figure 22, par une couronne intérieure et une couronne extérieure, reliées entre elles par des rais. Ces derniers sont profilés de manière à permettre l'encastrement des cales radiales d'extrêmité des enroulements (fig.23, coupe gh).

Le serrage de l'enroulement entre les plateaux est obtenu à hauteur des couronnes intérieures, avec des tirants de 14 m/m de diamètre.

A hauteur des couronnes extérieures, les tirants sont remplacés par des entretoises fixées en bout sur les couronnes (fig.23, rep.24 et 36).

En ce qui concerne le bridage dans le sens radial, nous avons vu qu'il faut tenir compte d'un effort, tendant à agrandir la surface des spires, uniformément réparti sur le contour des bobines et pouvant atteindre 15 Kg par cm. de longueur périphérique et par demi-bobine. Pour cette raison, chaque demi-bobine est cernée par deux cornières en AU4G de 50 x 50 x 5 m/m, fermées sur elles-mêmes (fig.18, rep.30 et 17). Sur ces cornières sont fixées les entretoises, sur chacune desquelles sont engagés deux boulons (fig.23, rep.28) dirigés suivant le sens radial. Les boulons jouent le rôle de verrins en appuyant sur des cales en bakélite, (rep.23 et 35) de mêmes dimensions que les entretoises et placées sur l'enroulement. Ce système permet d'appliquer à volonté les cales sur le conducteur.

Les entretoises sont au nombre de 56 par demi-bobine et sont réparties de façon à supporter toutes le même effort.

Pour maintenir en place les spires intérieures tant que les bobines ne sont pas introduites dans les cuves, on a prévu, à hauteur des couronnes intérieures des plateaux, des cales auxiliaires en bois (fig.19, rep.18,19, 31 et 32).

Elles sont au nombre de 14 par demi-bobine et épousent la forme de l'enroulement à l'endroit où elles sont destinées. Les cales situées sous les mises en séries sont modifiées en conséquence.

8°) CUVES -

Comme le montre la vue schématique de l'ensemble, les

cuves sont annulaires. Leurs parois sont constituées par deux flasques et deux cylindres coaxiaux. Le flasque du côté de la chambre, (ou "flasque avant") et le cylindre intérieur sont coulés d'une seule pièce (fig.18 et 19), (un assemblage étant impossible par suite du manque de place dans la région voisine de la chambre).

En ce qui concerne le dimensionnement des cuves, la fonderie nous a imposé plusieurs conditions :

- une épaisseur de paroi de 15 m/m minimum
- la nécessité d'exécuter le cylindre extérieur (ou "couronne extérieure") en 4 pièces, assemblées par des nervures extérieures parallèles à l'axe des bobines. Les joints n'étant pas prévus démontables sont enduits de pâte à joints genre "Hermétic" résistant à l'huile.

Toutes les pièces ont été coulées en AS13 (ou Alpax) et sont conçues pour être usinées entièrement sur le tour. Cette condition ne permet pas d'utiliser les emboitages (car ils ne seraient pas circulaires). Le centrage a été obtenu par des goupilles élastiques.

Les deux flasques portent les cercles de roulement en vue du mouvement de rotation. Ces derniers ont une largeur et une épaisseur calculées pour qu'il ne s'y produise pas de déformation permanente quand elles reposent sur les rouleaux du support. (cf. vue schématique).

Les flasques sont renforcés aux endroits où cela a été jugé nécessaire par des nervures. Ils comportent également des bossages pour le calage et la fixation des enroulements dans les cuves.

La couronne extérieure comporte la fenêtre de sortie des connexions (cf.fig.19) et le trou de vidange d'huile.

Sur le flasque arrière sont prévues les entrées et les sorties d'huile.

L'assemblage des pièces est fait avec des boulons en duralumin (fig.19, rep.63) et l'étanchéité est obtenue avec des joints en caoutchouc synthétique (fig.19, rep.64

et 65) résistant à l'huile.

9°) CALAGE de l'ENROULEMENT dans les CUVES -

a) Serrage de l'enroulement sur le flasque avant.

Les bobines sont serrées sur la face avant à hauteur des couronnes extérieures des plateaux de bridage par des tirants de 14 m/m de diamètre (fig.18, rep.51). Plateau et flasque ne sont pas en contact direct pour éviter l'usinage compliqué d'un épaulement qu'il aurait fallu prévoir sur le flasque. Le plateau porte sur ce dernier par l'intermédiaire de bossages, centrés sur l'axe des tirants, prévus aussi bien sur le flasque que sur le plateau et faciles à usiner par lamage (fig.18).

L'enroulement est également serré sur le flasque à hauteur des couronnes intérieures des plateaux.

Aux angles, on a placé sous l'enroulement et entre les plateaux d'une même demi-bobine, des cales (fig.22, rep.52-53).

Ces cales d'angles sont coulées en 2 AS 13, elles épousent d'une part la forme de l'enroulement et d'autre part celle de la cuve. (Pour cette raison, celles qui sont destinées à la première demi-bobine présentent un épaulement).

Elles sont traversées par un tirant vissé dans une saillie prévue à cet effet sur le flasque. En agissant sur des écrous, montés sur les tirants et prenant assise sur les cales, on ramène ces dernières vers le flasque avant.

Les cales, portant sur la couronne intérieure du plateau, l'entraînent, et, avec lui, toute la première demi-bobine, grâce au bridage individuel.

b) Calage de l'enroulement sur la couronne intérieure.

Dans ce but, on a placé sous la partie rectiligne de l'enroulement et dans les intervalles laissés libres par les cales auxiliaires, des cales réglables en hauteur (fig.18, rep.54 et 55).

Elles sont en effet exécutées en deux pièces superposées, pouvant glisser l'une sur l'autre, et dont le plan de séparation présente une légère pente par rapport à la couronne intérieure de la cuve.

La partie inférieure est traversée par un tirant vissé dans le flasque avant . Un écrou, monté sur le tirant et prenant assise sur la pièce, permet en le serrant, de chasser la partie supérieure vers l'enroulement et d'adapter ainsi la hauteur de la cale à l'espace qu'elle doit occuper entre l'enroulement et la couronne intérieure de la cuve. Les cales destinées à la première demi-bobine présentent un épaulement qui leur permet d'épouser la forme de l'enroulement.

Les cales d'angles et les cales réglables sont séparées du conducteur par un carton isolant de 1 m/m.

10°) SORTIES des CONNEXIONS -

Les connexions des deux demi-bobines d'une même cuve sont réalisées à l'intérieur même de celle-ci. Il y a donc deux bornes à sortir de chaque cuve.

Connexions intérieures.

Les extrêmités des conducteurs qui sont à connecter se terminent par des drapeaux d'environ 50 cm^2 de surface. Contre ces drapeaux sont serrées, avec 4 boulons, les pièces de raccordement en cuivre, (fig.20, rep.86) avec interposition de plaques en bimétal. (rep.85).

Les pièces de raccordement sont réunies par des barettes en cuivre (fig.21, rep.92).

Bornes de sorties.

Comme pour les connexions intérieures, on a fixé des pièces de raccordement sur les extrêmités des conducteurs. Dans ces pièces, sont vissées les tiges de sorties en cuivre de 20 m/m de diamètre (rep.95). Les tiges passent par des ouvertures prévues dans la plaque de fermeture (rep.97, fig.19).

L'étanchéité est obtenue par des presses-étoupes, logés dans des corps de bornes, eux-mêmes fixés par vis sur la plaque de fermeture (rep.99 à 106, fig.19).

11°) FIXATION et SUPPORT des BOBINES -

Nous avons déjà vu que les bobines sont soumises à un effort d'attraction, cet effort est enduré par 4 tiges filetées qui traversent les flasques à hauteur des cercles de roulement (cf.vue schématique).

Pour recevoir ces tiges, on a prévu en réalité sur chacun des flasques 8 saillies disposées à 45°. Ces saillies servent également d'assises aux écrous de blocage. Les 4 tiges pouvant ainsi être disposées de deux façons différentes, (2 dans le plan vertical et 2 dans le plan horizontal, ou les 4 dans les plans faisant 45° avec les précédents) le seront de manière à être le moins gênantes pour les expériences à faire. On peut à l'aide de ces tiges rendre les deux bobines solidaires l'une de l'autre (c'est le cas en marche normale ou quand on veut faire subir une rotation à l'ensemble des deux bobines).

Support.

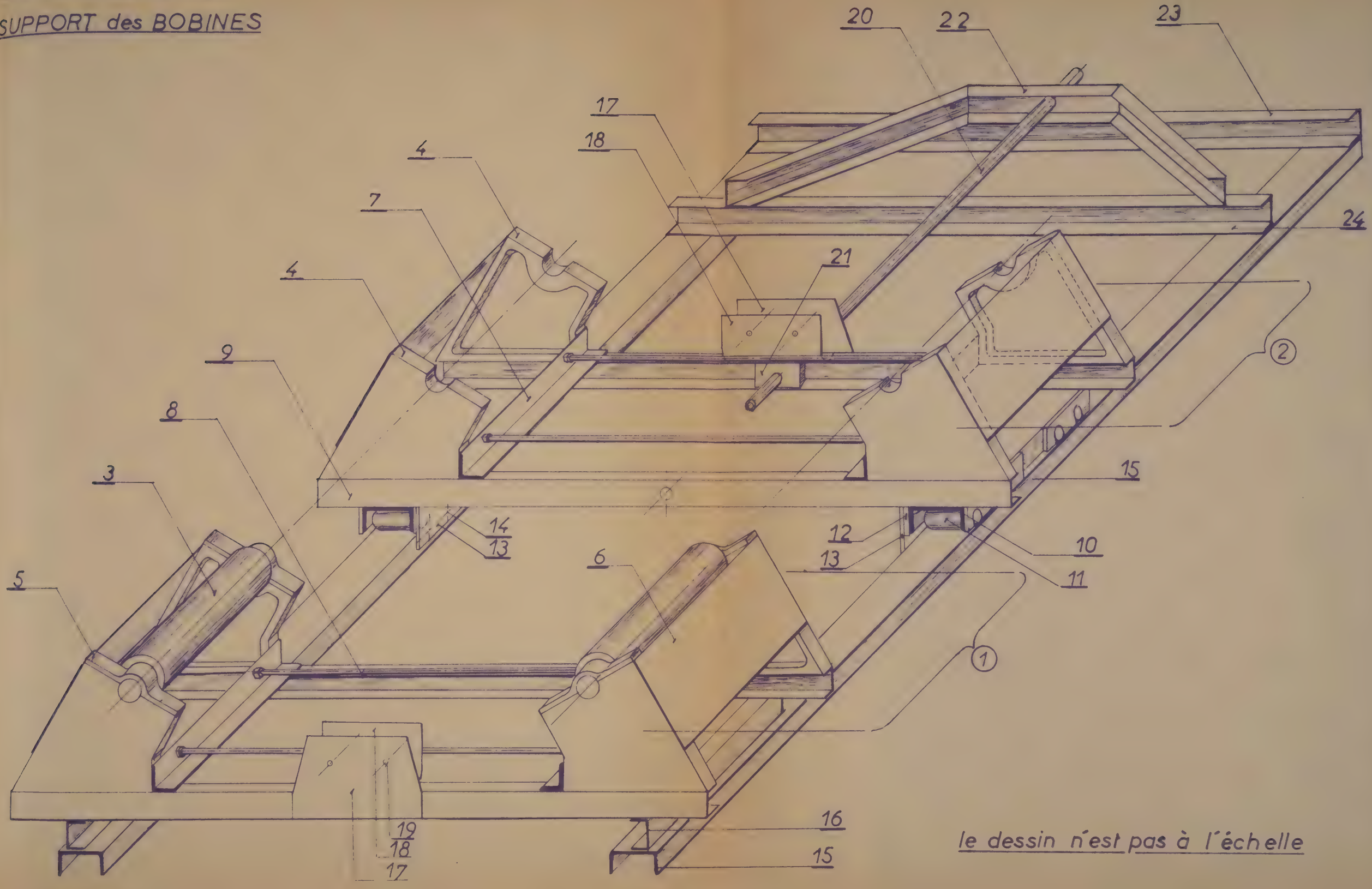
Les bobines reposent sur des socles indépendants, l'un étant fixe (cf.8 vue du support, rep.1), et l'autre mobile (rep.2) (il peut être translaté par rapport au premier et bloqué dans une position quelconque).

Pour permettre le mouvement de rotation de l'ensemble des deux bobines, celles-ci reposent par leurs cercles de roulement sur deux cylindres (rep.3) dont le diamètre est de 100 m/m et la longueur égale à la longueur axiale des bobines. Les cylindres se terminent par des tourillons logés dans des paliers en bronze (rep. 4 et 5).

La rotation se fait facilement à la main, c'est pourquoi aucun organe de commande n'est prévu. Un système simple (rep.17 à 19) permet de bloquer les bobines dans n'importe quelle position.

Vue schématique du

SUPPORT des BOBINES



le dessin n'est pas à l'échelle

Les deux paliers soutenant un même rouleau sont reliés et maintenus par des cornières (rep.7) et des plaques (rep.6) en tôle de 5 m/m. Ils sont fixés sur des traverses (rep.9) constituées par des U de 80 x 40 x 4 de manière à ce que l'on puisse translater légèrement chaque palier (la course maximum est de 10 m/m). Ceci en vue du réglage de l'écartement des deux paliers en regard, ou, ce qui revient au même, du parallélisme des deux rouleaux.

Le réglage en hauteur des tourillons peut être fait en plaçant un feuillard sous le palier intéressé.

Bloc mobile.

Les traverses qui portent les paliers sont montées sur des U de 125 x 64 x 8 (rep.10), parallèles à l'axe des bobines. Des petits rouleaux (rep.11), logés dans ce dernier profilé, facilitent la translation.

Les rouleaux se terminent en bout par des tourillons qui tournent dans des alésages prévus dans des plaques de bronze (rep.12) et qui sont fixés sur les ailes du profilé (10).

Le guidage du bloc mobile est assuré par des patins (méplats en AU4G) dont l'écartement est réglable et qui frottent sur les ailes d'un profilé U qui forme rail (rep.15).

Le déplacement est obtenu à l'aide d'une vis en laiton (de 40 m/m de diamètre, pas = 4 m/m commandée à la main). (rep.20).

Bloc fixe.

Ce bloc est monté à demeure sur les rails. Les traverses qui portent les paliers sont amenées à la même hauteur que celles du bloc mobile à l'aide de deux U de 80 x 40 x 4 (rep.16).

Le choix de la matière des profilés constituant le support a été fait suivant la disponibilité de ces derniers, à part les rouleaux et les U de 125 x 64 x 8 qui

sont en AG5, tous les éléments sont en AU4G.

12°) REFROIDISSEMENT -

Généralités.

La puissance à évacuer est de 60 kw, soit environ 51.840 Cal/heure.

En se basant sur un échauffement de l'huile de 15°C (de 30° à 45°C)et une chaleur spécifique de 0,45 la quantité d'huile nécessaire au refroidissement sera d'environ 8.800 litres par heure. L'huile utilisée est de l'huile minérale de transformateur (modèle TR3S) dont les caractéristiques principales sont les suivantes : densité 0,870 - rigidité diélectrique : 55.000 volts

viscosité à 20°C : 5,23 dégrés Engler

" à 50°C : 2 " "

La perte de charge a été évaluée à 300 grammes/cm^2 à l'intérieur des cuves et ne devrait pas dépasser 1 Kg/cm^2 pour l'ensemble de l'installation.

Le volume d'huile contenue dans les deux cuves est de 1.800 litres.

Circulation de l'huile à l'intérieur des cuves.

L'entrée et la sortie de l'huile se font par le flasque du côté opposé à la chambre.

En première approximation, on peut dire que l'huile se déplace dans deux cylindres coaxiaux. Le premier est limité par la couronne intérieure des cuves et les spires intérieures du bobinage, le deuxième, par les spires intérieures et extérieures de l'enroulement (voir fig.24 ou fig.19).

L'huile circule du flasque arrière vers le flasque avant dans le premier cylindre et en sens contraire dans le second.

Pour atteindre le flasque avant, l'huile se déplace dans les espaces laissés libres entre les cales auxiliaires et les cales réglables. Elle est empêchée de pénétrer

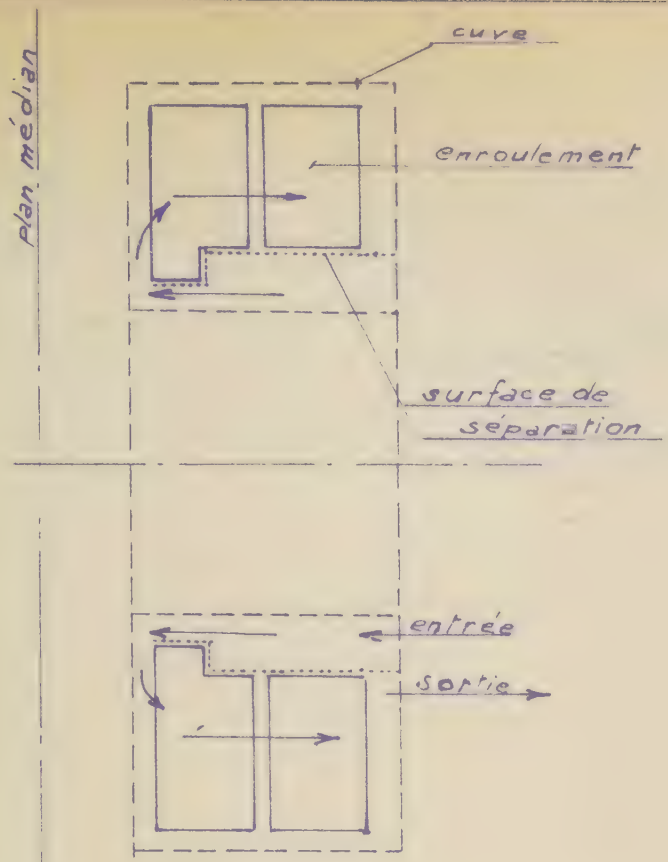


figure 24

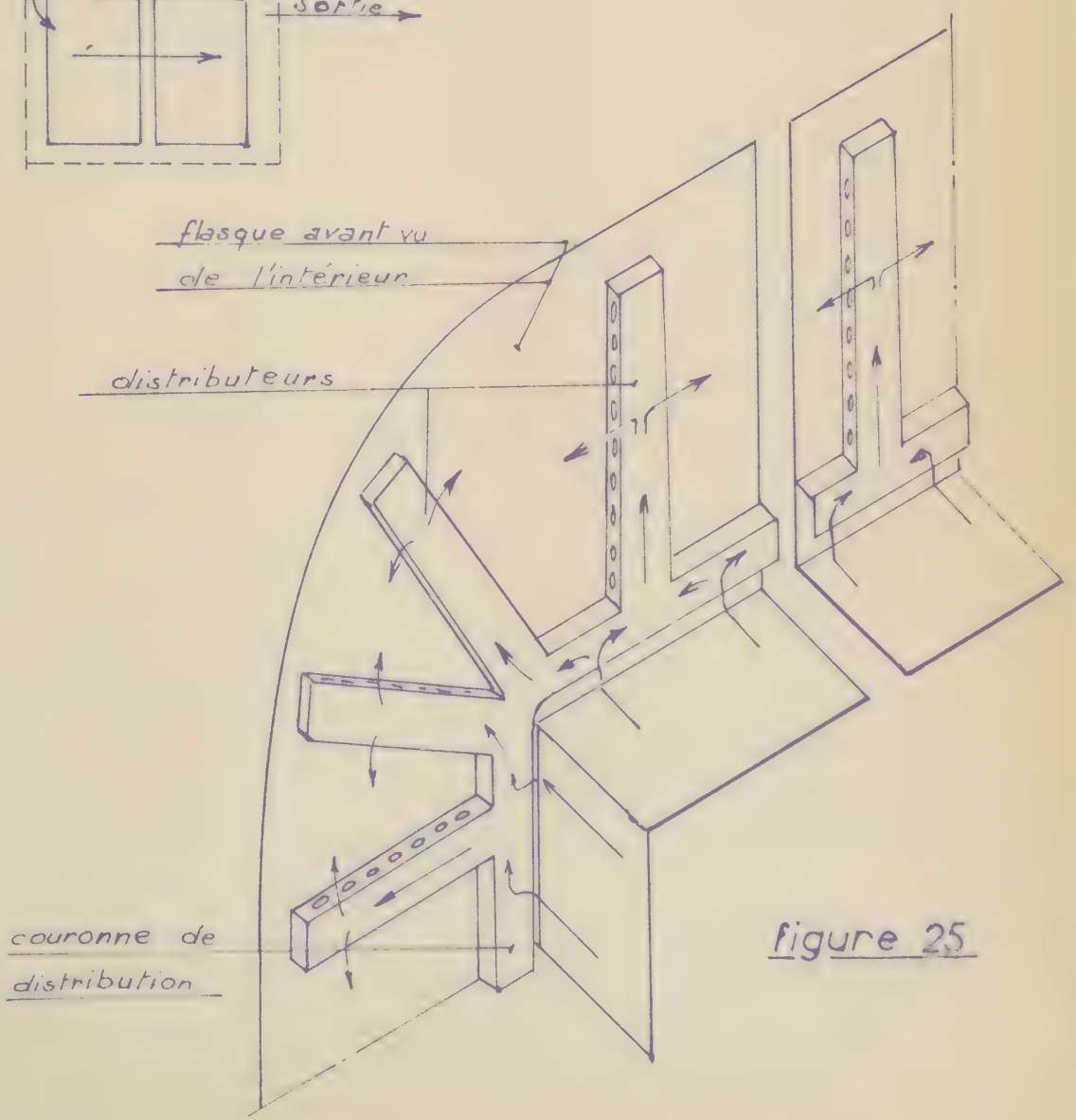


figure 25

directement dans l'enroulement par des petits déflecteurs en presspahn (fig.19, rep.76-79). L'huile débouche ensuite sur le flasque avant dans une couronne de distribution. Cette couronne alimente des distributeurs radiaux, placés sur le flasque (fig.19, rep.70) ou (fig.25).

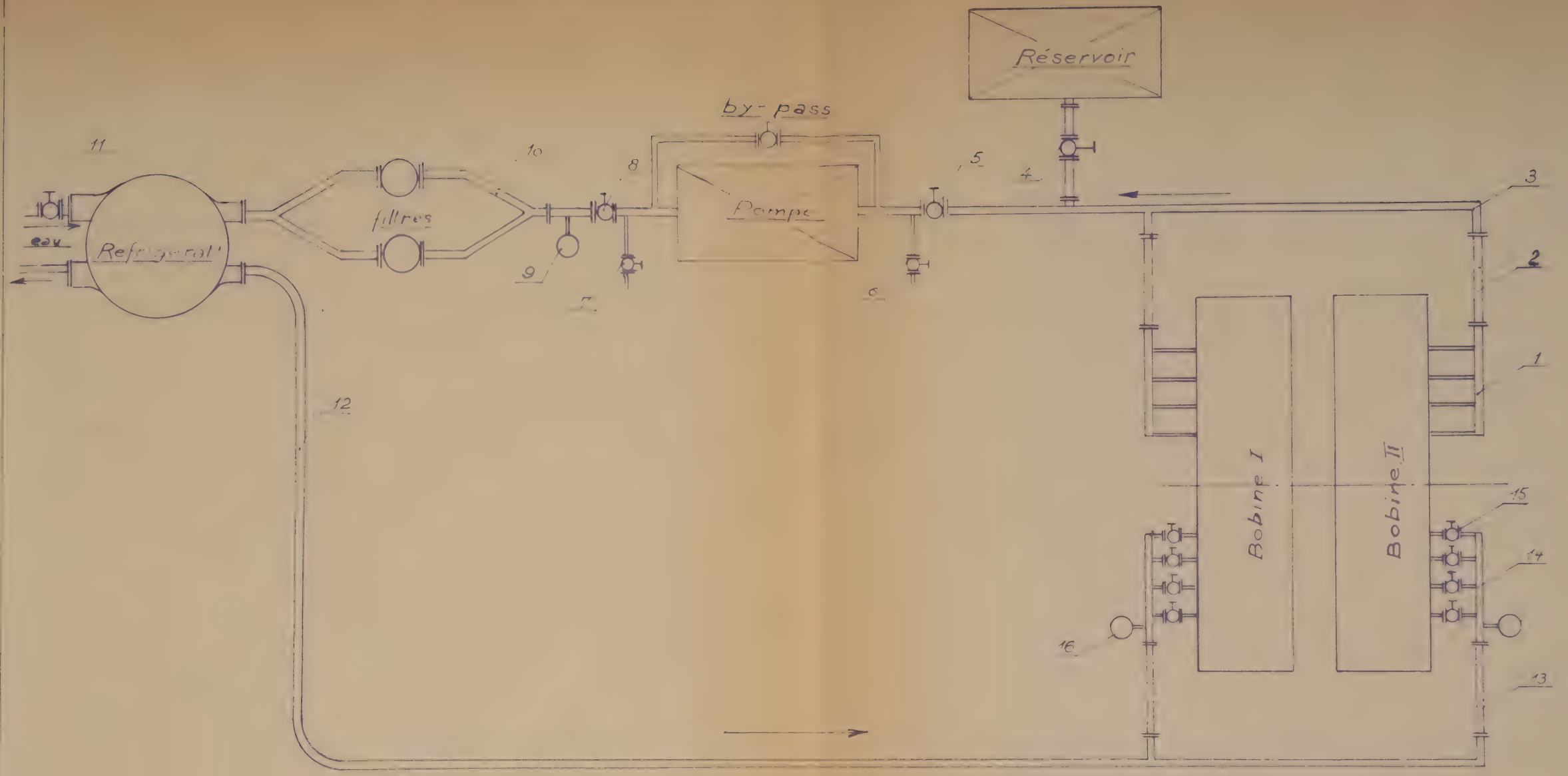
Partant du flasque avant, l'huile traverse l'enroulement. Des chicanes, (tôles fixées sur les nervures du flasque arrière) (fig.19, rep.66-69) ont pour but d'équilibrer les pertes de charges. Celles-ci ne sont en effet pas les mêmes pour l'huile traversant les canaux des spires intérieures et celle traversant les canaux des spires extérieures. Les tôles (rep.66-69) sont repliées et portent un cordon de feutre qui prend appui sur la couronne intérieure du dernier plateau de bridage. On empêche de cette façon l'huile chaude de se mélanger à l'huile froide.

Notons encore que, du point de vue refroidissement, chaque bobine est divisée en 4 secteurs, indépendants, limités par les plans qui sont définis par l'axe de la bobine d'une part et les diagonales des rectangles formés par les spires d'autre part. Chacun de ces 4 secteurs possède son entrée et sa sortie d'huile sur le flasque arrière. Ceci permet de refroidir plus ou moins chaque secteur et, de ce fait, de faire varier le gradient de température dans le volume utile.

Circulation extérieure.

L'huile chaude sortant des cuves est collectée, aspirée, et refoulée par une pompe, à travers des filtres, dans un réfrigérateur et est finalement renvoyée dans les enroulements. Nous allons voir successivement en détail les éléments du circuit.

L'huile, évacuée par les 4 sorties du flasque arrière, est collectée par une couronne (tube cintré, en cuivre, de 60 m/m de diamètre intérieur). Sur ce tube est raccordé un flexible en caoutchouc synthétique (rep. 2 sur le



Rep	Désignation
16	Manomètre 0 5 kg
15	Vannes à clapet
14	couronne de distribution d'arrivée
13	flexible
12	rampe fonte
11	vanne arrivée eau
10	rampe fonte
9	manomètre pression de marche
8	vanne arrêt refoulement
7	vanne avec tubulure transvasement
6	vanne 20/27 " "
5	vanne sur arrivée pompe
4	vanne liaison reservoir
3	rampe fonte
2	flexible
1	couronne de distribution départ
Rep.	Désignation

Refroidissement des Bobines
Circuit de l'Huile

G.W.

schéma de la circulation)qui mène l'huile à une rampe (rep.3). Cette dernière, en fonte dirige l'huile des deux bobines vers la pompe.

La pompe, du type SCAM-IMO, comporte trois rotors à axes parallèles qui tournent dans trois alésages se recoupant de façon symétrique. Ces rotors ont l'aspect de vis hélicoïdales. La vis centrale est en acier et les satellites sont en fonte.

La pompe est munie d'une soupape de sûreté et d'un bypass à main.

La puissance absorbée est de 2,53 chevaux pour un débit de 160 litre/minute et une pression de refoulement de 3 Kg/cm^2. Son rendement est de 70 %. Elle est construite pour travailler avec un liquide de viscosité égale à 3 dégrés Engler (ce qui correspond à une température de l'huile de 42°C environ).

Une autre rampe (rep.10) conduit l'huile de la pompe à deux filtres montés en parallèle (la liaison est faite par T brasés et les assemblages sont exécutés par brides).

Ces filtres, du type SCAM-AK (à tamis auto-klean) peuvent être nettoyés en service sans démontage par un simple tour de manivelle. Le débit maximum pour chacun d'eux est de 5.000 litres, par heure, d'où la nécessité de monter deux filtres en parallèle.

Leur principe est le suivant : l'huile traverse une série de disques superposés et solidaires de l'axe de l'appareil. En tournant cet axe, les impuretés, déposées entre les disques dont l'écart est de 7/100 de m/m et qui forment les mailles, sont enlevées par des grattoirs et recueillies dans une cavité prévue à cet effet.

Après les filtres, l'huile traverse un réfrigérateur tubulaire. Les caractéristiques fondamentales de ce dernier sont les suivantes :
Quantité de chaleur à évacuer par heure : 51.840 Cal.

Température de l'huile admise à la sortie du réfrigérant : 30°C.
Température admise à l'entrée : 45°C.

Le débit d'eau de refroidissement est de 10 m^3/heure. Les températures d'entrée et de sortie de l'eau sont 10°C et 14,5°C respectivement.

L'huile est refroidie dans des tubes de cuivre de 13,5-15 m/m de diamètre. La surface d'échange est de 14 m^2.

L'appareil est en position verticale (le réfrigérateur, sans son socle, a une hauteur de 2,20 m et un diamètre de corps de 350 m/m.

Les entrées et sorties de l'eau, ainsi que celles de l'huile, sont munies de cuvettes pour le repérage des températures à l'aide de thermomètres.

Entre la sortie du réfrigérateur et l'entrée de l'huile dans les cuves, les éléments constituant le circuit sont les suivants :

- Une rampe (rep.12), en fonte, (diamètre intérieur 60 m/m) raccordée par bride au réfrigérant, avec, à l'autre extrêmité, deux prises brasées pour la jonction de tuyaux flexibles (rep.13) allant aux bobines.

- Sur chaque cuve une couronne de distribution d'huile (rep.14) sur laquelle est raccordé le flexible et constituée par un tube cintré en cuivre.

Sur ces couronnes sont brasés les tubes de raccord de diamètre 27/34 m/m, fixés par des vis creuses à tête 6 pans sur le fond des cuves. Sur chacun de ces petits tubes est prévue une vanne à clapet tout bronze (rep.15) qui permet de régler le débit d'huile dans le secteur qu'il alimente.

Un manomètre (rep.16), monté sur chaque couronne de distribution indique la pression sous laquelle se fait l'alimentation des bobines.

Un réservoir est raccordé sur la rampe arrivée à la pompe par une tubulure comportant une vanne (rep.4). La

capacité du réservoir est de 300 litres, il ne doit contenir normalement que 200 litres d'huile environ, afin de permettre la libre dilatation de l'huile contenue dans toute l'installation. Une ouverture pratiquée dans le haut du réservoir, constitue le seul point de l'installation qui soit en contact avec l'atmosphère. La pression en amont de la pompe est donc égale à la pression atmosphérique plus la pression d'huile due à la hauteur du niveau dans le réservoir. La pression en aval est fonction de la perte de charge de l'ensemble et sera d'environ $1 Kg/cm^2$. Un manomètre (rep.9) indique cette pression de régime.

En amont et en aval de la pompe sont prévues deux vannes (rep. 5 et 8) réglant l'aspiration et le refoulement.

A l'aide de deux dérivations (rep. 6 et 7) pratiquées, l'une en amont, l'autre en aval de la pompe, on peut se servir de cette dernière pour des opérations de transvasement. On voit sur le schéma de l'installation que la pompe peut être rendue indépendante du restant de l'installation par un simple jeu de vannes.

13°) CONTROLE de la TEMPERATURE des ENROULEMENTS -

On a vu que, du point de vue refroidissement, chaque bobine est divisée en 4 secteurs indépendants. En vue de connaître la température de l'enroulement, on a monté, dans chacun de ces secteurs, et aux points où le refroidissement semble être le moins efficace, deux thermo-couples en série.

Les couples sont en constantan-cuivre. Pour les sortir des cuves, on a prévu sur la fenêtre de fermeture de chaque cuve, deux cosses étanches à 5 plots. Les couples sont sortis par des cordons compensateurs et reliés à un commutateur bipolaire à 12 directions.

Un galvanomètre indicateur, gradué en différences de températures (température de l'enroulement et température de référence) permet de repérer successivement la température dans chaque secteur.

Le branchement des couples et le cablage sont faits de manière à utiliser un minimum de cordon compensateur.

14°) CIRCUIT ELECTRIQUE -

Le courant continu est fourni par un groupe convertisseur constitué comme suit :

- 1 moteur asynchrone triphasé de 100 cv.-127/220 volts 1455 tours/minute.
- 1 génératrice à excitation séparée, 60 kw, 500 Amp. tension variable entre 60 et 120 volts.
- 1 excitatrice shunt, 115 volts. 1 kw, 1455 tours/minute.
- 1 rhéostat de démarrage.

Le moteur est protégé par un contacteur.-disjoncteur sous coffret et comprenant :

- 1 contacteur à soufflage magnétique
- 1 contact d'auto-alimentation
- 1 protection magnéto-thermique
- 2 relais de protection

Un contact, monté sur le rhéostat de démarrage ne permet la mise en route du groupe que lorsque le rhéostat est dans sa position de démarrage.

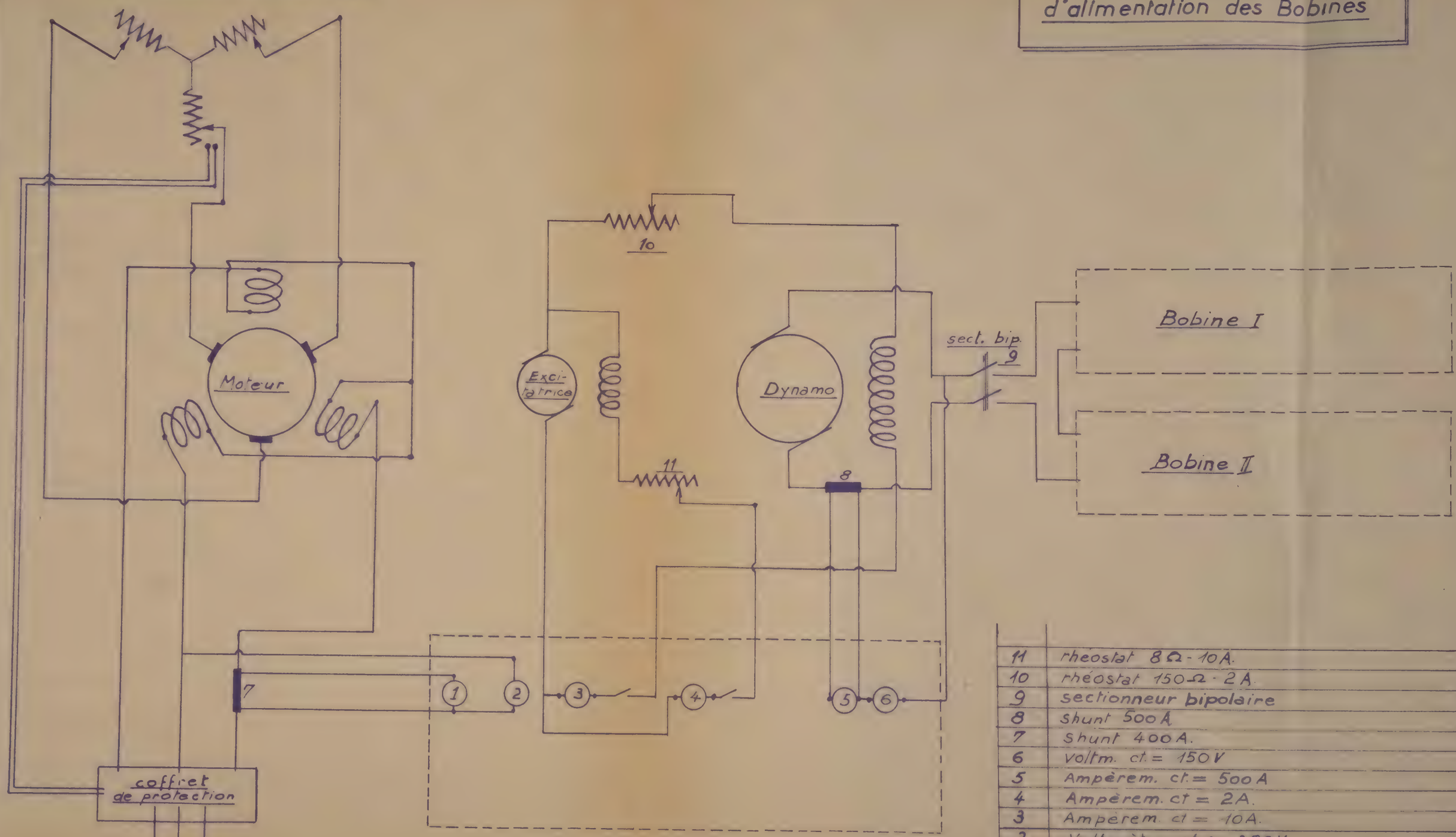
Deux rhéostats, l'un branché dans le circuit inducteur, et l'autre dans le circuit induit de l'excitatrice, permettent de régler la tension de la dynamo.

Les deux bobines sont branchées en série comme le montre le schéma.

Des appareils de mesure et de contrôle, placés sur un tableau, permettent de vérifier à chaque instant les conditions de fonctionnement du groupe, et d'alimentation des bobines.

Circuit Electrique d'alimentation des Bobines

Rhéostat de démarage



Rep	Designation
11	rhéostat 8 Ω - 10 A.
10	rhéostat 150 Ω - 2 A.
9	sectionneur bipolaire
8	shunt 500 A.
7	shunt 400 A.
6	voltm. ct = 150 V
5	Ampèrem. ct = 500 A
4	Ampèrem. ct = 2 A.
3	Amperem. ct = 10 A.
2	Voltmètre ct ∿ 380 V
1	Ampmètre ct ∿ 400 A

Chapitre III

EXPERIMENTATION DES BOBINES

1°) ESSAIS DIVERS.

a) Résistance de l'enroulement.

La mesure de la résistance a été faite par la méthode industrielle de l'ampéremètre et du voltmètre pour chaque demi-bobine sur le banc d'essais de la Compagnie Electro-Mécanique au Havre. Les résistances ont été trouvées égales à 0,042 et 0,044 ohms pour les demi-bobines ne comportant que 126 spires et égales à 0,055 et 0,054 ohms pour les demi-bobines qui ont 160 spires. Ces résistances ont été mesurées à une température de 18°C. (Température ambiante). La résistance totale à 18°C. est de 0,195 ohms.

b) Résistance d'isolement.

La résistance d'isolement par rapport à la masse pour les demi-bobines prises individuellement varie entre 75 et 100 mégohms suivant la demi-bobine considérée. Elle est de 5 mégohms pour l'ensemble monté.

c) Résistance aux efforts électromagnétiques et de dilatation.

Cet essai a été exécuté avant que les enroulements ne soient introduits dans les cuves. Les enroulements étant déjà échauffés, on a fait passer 800 ampères pendant 3 minutes. Un thermomètre, glissé entre les spires, a indiqué que le conducteur avait atteint 70° à 80°C. Aucune déformation permanente n'a été constatée lorsque le conducteur était revenu à une température voisine de la température ambiante.

d) Essai des cuves.

De même, les cuves, après avoir contenu de l'air comprimé (sous une pression de 1 Kg/cm^2 pendant 24 heures, n'ont accusé aucune déformation permanente-(la flèche

prise par les flasques à 1 Kg./cm^2 était de 2,5 à 3 m/m). Les vérifications ont été faites avec un comparateur à quadrant. L'étanchéité a été vérifiée en étalant, sur la surface extérieure des cuves, de l'eau de savon qui aurait indiqué toute fuite éventuelle par formation de bulles.

2°) REGIME DE FONCTIONNEMENT - REFROIDISSEMENT -

Les premiers essais ont montré que la puissance électrique nécessaire pour faire passer 500 ampères dans l'enroulement, est inférieure à ce que l'on escomptait. Ceci provient du fait que le refroidissement est plus efficace qu'il n'avait été prévu.

La perte de charge pour la circulation de l'huile, évaluée à l'intérieur des cuves par comparaison avec des appareils de construction analogue (transformateur etc...) à 300 gr/cm^2, n'est effectivement que de 150 gr/cm^2.

De même, on comptait sur une perte de charge de 800 à 1000 gr/cm^2 pour l'ensemble de l'installation, et nous avons trouvé qu'elle n'est que de 300 gr/cm^2.

Nous donnons ci-dessous les résultats moyens, relatifs au régime permanent, portant sur plusieurs séries d'expériences différentes, en indiquant également le plus grand écart observé d'une série à l'autre lorsqu'il est notable, et enfin, s'il y a lieu, la valeur maxima que l'on s'était fixée dans les calculs.

Grandeur	Valeur moyenne mesurée	Plus grand écart observé	Valeur max. fixée par calculs
Courant dans l'enroulement maintenu à 500 ampères	500	par définition	500
Tension aux bornes de l'enroulement (volts)	104	+ 2	114
Puissance dissipée dans l'enroulement (Kw.)	52	+ 1	57
Puissance demandée au réseau (KVA)	88		95
Perte de charge pour la circulation dans les cuves toute l'installation (gr/cm^2)	150 300		300 800
Puissance absorbée par le moteur de la pompe (watts)	650		1.900

Quant au régime du réfrigérateur, les températures relevées ont été les suivantes :

Température d'entrée de l'eau : 11°C.
Température de sortie de l'eau : 14°C.
Température d'entrée de l'huile : 26°C.
Température de sortie de l'huile: 21°C.

Le débit d'eau était réduit au tiers environ du débit normal.

En ce qui concerne l'élévation de température en différents points de l'enroulement, repérée à l'aide de thermo-couples logés dans chaque secteur, on peut dire que l'enroulement s'échauffe le plus dans le haut des bobines. Les thermo-couples de ces secteurs indiquent une élévation de 17° à 18°C. par rapport à la température ambiante, alors que les couples placés dans le bas de l'enroulement n'accusent que 7° à 8°C. d'élévation. Les couples des secteurs latéraux enfin, indiquent une élévation de 10° à 11°C.

Rappelons que ces couples qui ne servent qu'au contrôle, sont logés au milieu de l'enroulement et n'indiquent donc pas la température de l'huile à la sortie du secteur.

Nous avons reproduit ci-joint (graphique IX) les courbes montrant les variations des grandeurs mentionnées ci-dessus en fonction du temps lors d'un essai où la circulation d'eau a été utilisée seulement 110 minutes après la mise en route, en vue d'atteindre plus vite le régime permanent.

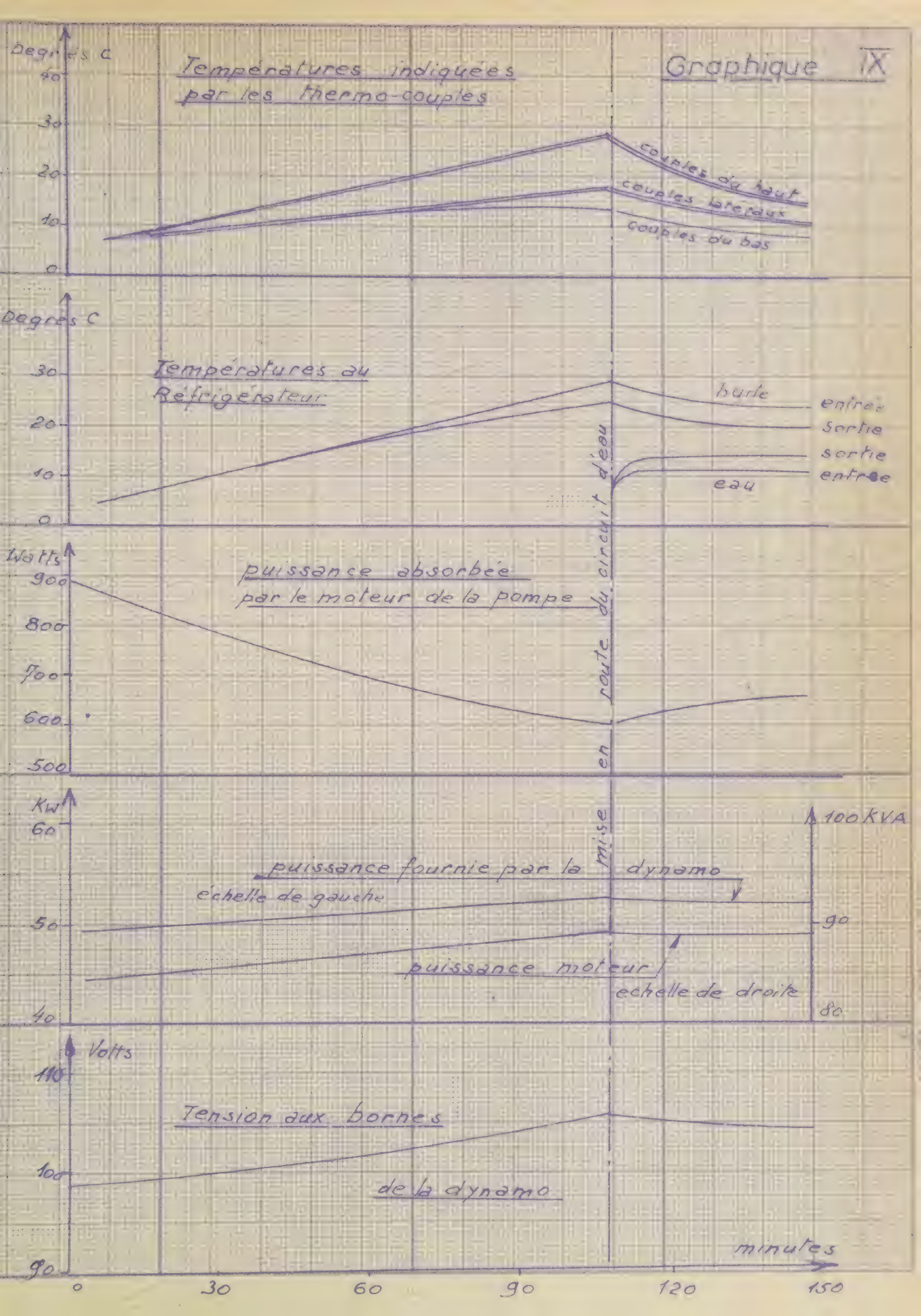
3°) GRADIENT de TEMPERATURE.

Il est à remarquer que lorsqu'aucune précaution particulière n'est prise, il y a un léger courant d'air ascendant entre les deux bobines, ce qui ne permet pas de donner un résultat bien défini.

Une première série de mésures a donc été faite en obturant l'intervalle entre les deux bobines à hauteur de la paroi inférieure de la chambre, tous les autres côtés restant ouverts à l'air libre.

Dans ces conditions, on a repéré, à l'aide de deux thermomètres gradués au dixième, entre le bord inférieur et le bord supérieur du volume utile, une différence de 0,1°C en régime permanent.

Une deuxième série de mesures a été réalisée en fermant à l'aide de contreplaqué, toutes les faces du volume utile, sauf celles qui auraient obturé le creux axial. Ce dernier n'a été fermé qu'aux extrêmités des bobines en vue de faciliter les échanges entre le creux des bobines et le volume utile. Dans ces conditions, le gradient est plus marqué que dans le ca précédent . Les températures repérées ont été les suivantes (1 heure et 30 minutes après obturation des intervalles et de fonctionnement en régime permanent) : A hauteur de la paroi supérieure de la chambre : 14,3°C. au centre : 14,4°C. et 14,3° C.aux angles.


Graphique IX
Températures indiquées par les thermo-couples
Degrés C
40
30
20
10
0
couples du haut
couples latéraux
couples du bas
Températures du Réfrigérateur
Degrés C
30
20
10
0
barre
entrée
sortie
sortie
entrée
eau
Watts
900
800
700
600
500
puissance absorbée par le moteur de la pompe
en route du circuit d'eau
Kw
60
50
40
100 KVA
90
80
puissance fournie par la dynamo
échelle de gauche
puissance moteur
échelle de droite
mise
Volts
110
100
90
Tension aux bornes de la dynamo
minutes
0
30
60
90
120
150

La température repérée au centre de la chambre était de 14,2°C., et enfin, à hauteur de la paroi inférieure de la chambre, on a trouvé 13,9°C. au centre, 14,0°C et 14,1°C aux angles. Température ambiante : 5,1°C.à 5,3°C.

On peut donc affirmer que le gradient de température dû aux seules bobines est au plus égal à celui escompté (0,5°C.). Il se peut que pour une température ambiante plus élevée, le gradient soit un peu plus marqué.

Les résultats ci-dessus ne sont valables que si toutes les vannes d'arrivée d'huile aux divers secteurs sont complètement ouvertes.

On peut agir sur le gradient de température en fermant plus ou moins une ou plusieurs vannes. Les combinaisons possibles sont trop nombreuses pour qu'on puisse songer à donner des résultats détaillés. Néanmoins, en se basant sur les essais qui ont été faits, on peut affirmer que pour une température ambiante d'environ 5°C. (elle sera en général plus élevée), et en fermant à moitié, sur chaque bobine la vanne d'arrivée correspondant à un même secteur, la température moyenne dans le volume utile, dans les conditions de la deuxième série d'essais, monte d'environ 2°C. et le gradient de température dans la région voisine du secteur est modifié de 0,1° à 0,2°C.

4°) CHAMP MAGNETIQUE et sa TOPOGRAPHIE.

Deux catégories de mesures ont été faites :

a) Mesure du champ au centre pour une intensité donnée de courant.
b) Mesure des variations du champ d'un point à l'autre du volume utile pour cette intensité de courant.

a) Mesure du champ au centre.

Avant de décrire l'appareillage utilisé pour la mesure du champ et de l'intensité de courant, il nous faut donner une définition pratique du centre des bobines. Il faut en

effet distinguer le centre "mécanique" et le centre "magnétique".

Il est impossible de connaître le centre mécanique avec une précision supérieure à celle avec laquelle les usinages ont été réalisés. D'où les précautions prises pour l'usinage des cuves et les soins apportés au centrage des flasques sur le tour. Le centre des cercles de roulement des bobines a été obtenu en pratique en se basant sur les 4 des 8 trous destinés aux tirants (qui servent à régler et maintenir l'écartement des bobines) qui sont restés libres. On estime, connaissant les tolérances appliquées à toutes les pièces lors de leur construction, que l'axe géométrique des enroulements ne doit pas passer à plus de 1,5 m/m du centre ainsi défini.

Le plan médian est connu avec plus de précision car l'écart des bobines peut être connu et réglé à l'aide des tirants avec une erreur inférieure à 0,5 m/m.

Quant au centre magnétique des bobines, il peut être considéré comme étant le centre de symétrie de l'ensemble des courbes qui représentent la topographie de la composante axiale du champ dans le plan médian. Il n'a été connu qu'avec le premier relevé topographique, et, vu la précision avec laquelle il peut être déterminé, (nous reviendrons plus loin sur cette précision) on peut dire que sa distance au centre mécanique est inférieure à 3 m/m.

Néanmoins, la topographie montre que dans une large zone autour du centre (dans un cercle de rayon au moins égal à 4 cm.) les variations du champ ne dépassent pas 0,2 oersteds; par conséquent l'erreur relative sur la mesure du champ, due à l'incertitude sur la position du centre, sera inférieure à 1/10.000.

Le champ a été mesuré avec une bobine exploratrice reliée à un fluxmètre. Afin de faciliter la mesure et d'éliminer les erreurs dues à ce que la bobine exploratrice pourrait ne pas être parallèle aux flasques, on a

matérialisé le plan médian par une plaque de contreplaqué, qui peut être calée entre les bobines par des verrins et dont la distance aux flasques est réglable.

La bobine exploratrice dont on s'est servi pour la mesure du champ est constituée par un fil de cuivre de 20/100ème (dont l'amagnétisme a été vérifié dans un électro-aimant) enroulé dans la gorge d'un disque en plexiglass et noyé dans de la paraffine. Le tout est maintenu dans une couronne en plexiglass en vue d'éviter toute déformation de l'enroulement.

Le nombre des spires de la bobine est de 100, et la surface moyenne d'une spire est de 4 cm^2. La résistance de la bobine est de 7,2 ohms.

Le fluxmètre utilisé est un appareil "Hartmann & Braun", classe 0,2. Sa sensibilité par division est de 15.000 maxwells et le nombre de divisions est de 125.

L'ensemble : bobine exploratrice, cordon, fluxmètre, a été étalonné au Groupe des Laboratoires du CNRS de Bellevue, dans le Laboratoire A.Cotton, grâce à la complaisance de M.Tsaï. Le champ qui a servi comme étalon est celui d'un aimant permanent, mesuré et contrôlé par une balance de Cotton. Il était de 1.212,5 $\pm$ 0,2 oersteds.

La surface de la bobine exploratrice a été trouvée égale à 395,8$\pm$0,5 cm^2. La déviation du fluxmètre pour un retournement de la bobine exploratrice dans un champ de 1.212,5 Oe. est de 64,0 divisions.

Ont été vérifiées également :
la sensibilité du fluxmètre pour de très petites variations de champ;
la fidélité de l'appareil (quelle que soit la région de l'échelle utilisée, on a toujours obtenu une déviation de 64,0 $\pm$ 0,1 divisions).

Notons encore que ce fluxmètre possède un léger couple de rappel, il dévie d'une division en 10 minutes environ, lorsque la bobine est connectée, mais la lecture

n'est pas influencée par cette dérive très lente. Pour la remise à zéro du fluxmètre, ou, pour bien mettre l'aiguille sur une division avant de faire une mesure,en vue de faciliter la lecture, on décharge une batterie de 4,5 volts à travers une résistance de 60.000 ohms dans le fluxmètre.

Pour la mesure de l'intensité du courant dans l'enroulement, on a utilisé un shunt de 500 ampères, 0,1 volts, qui a été étalonné au Laboratoire Central des Industries Electriques.

Les résultats de cet étalonnage sont les suivants :

Température ambiante.	Courant dans le shunt (ampères)	Température relevée au centre des lames (degrés C)	Résistance mesurée (microhms)
15°C	100	19	200,8
	300	57	201,0
	500	106	201,0
20°C	100	24	200,8
	300	60	201,0
	500	109	201,0

La différence de potentiel aux bornes du shunt a été relevée à l'aide d'un millivoltmètre AOIP (Appareil G221), de classe 0,2 , à index lumineux, étalonné spécialement pour cet usage.

Sa consommation pour 150 millivolts est de 7,5 micro-ampères, soit une résistance intérieure de 20.000 ohms. L'influence de la résistance des cordons est donc négligeable.

L'intensité du courant sera donc connue avec une précision de 0,2%. C'est d'ailleurs la limite de ce que l'on peut obtenir, car la stabilité est de cet ordre (des fluctuations de l'intensité de 0,1% sont nettement décelables sur le millivoltmètre).

Par contre, l'erreur sur la valeur du champ sera un peu supérieure. Tandis que l'on apprécie une variation de 1/10 de division sur le fluxmètre, on ne peut compter

que sur le quart de division pour les lectures, du fait de la fidélité de l'appareil.

Le résultat des mesures est le suivant :

	Valeur mesurée.	Valeur mesurée par un autre opérateur.	Valeur calculée.
champ magnétique au centre en oersteds	1953 ± 4	1952 ± 4	1957 ± 2
pour une intensité de (en ampères)	500 ± 1	500 ± 1	500

TOPOGRAPHIE DU CHAMP MAGNETIQUE -

En vue de pouvoir déterminer les faibles variations du champ, on a construit une autre bobine exploratrice, semblable à la première, mais plus grande. Le nombre de spires est de 250 (fil de 40/100 m/m et la surface totale est de 7.340 ± 30 cm^2).

Une déviation d'une division du fluxmètre correspond à une variation du champ de 2,03 ± 0,08 oersteds, soit pour 1953 oersteds une variation de 0,11%.

La lecture pouvant être faite au quart de division, les variations décelées sont donc de 0,025%, sauf pour les déviations inférieures à 2 divisions pour lesquelles, par suite d'une meilleure fidélité, celles-ci seront abaissées à 0,01%.

Résultats :

Variations du champ le long de l'axe (Oz) des bobines en fonction de la distance z au plan médian, relevées avec la grande bobine exploratrice.

z = (cm.) →	2	6	10	20	30
Variation du champ magnétique en % →	-0,06	-0,2	-0,6	-2,25	- 6

Champ existant en d'autres points de l'axe, exprimé en % du champ au centre, et mesuré avec la petite bobine exploratrice.

z = (cm) →	70	120	170	270
Champ en % du champ au centre. →	59	21	6,6	1,5

On voit que le champ diminue assez rapidement quand on s'éloigne des bobines; ceci est également vrai dans le sens perpendiculaire à l'axe Oz. Le tableau ci-dessous donne, exprimé en % du champ au centre, la composante axiale du champ existant en quatre points situés sur l'axe Ox (horizontal) et en dehors des bobines.

Point	bord extérieur des bobines à hauteur des cercles de roulement	à 25cm du bord	à 50cm du bord	à 1 m du bord
composante axiale en % du champ au centre. →	7	4,9	3,2	1,5

On a également mesuré le champ au centre des bobines pour des écartements des bobines différents de l'écartement normal (120 m/m).

écart en m/m	120	170	220
Champ en oersteds	1953 ± 4	1836 ± 4 soit 94%	1761 ± 4

La topographie de la composante axiale du champ dans le plan médian a été relevée à huit reprises pour tous les points du plan, de 2 cm en 2 cm. On l'a reproduite pour un quart du plan médian sur le graphique X où l'on a tracé les lignes topographiques reliant les points pour lesquels les pourcentages des variations sont les mêmes (de 0,1 en 0,1%).

Compte tenu de la précision obtenue avec la grande bobine exploratrice, l'erreur sur le gradient du champ magnétique reste constante.

Aucune dissymétrie systématique des lignes topographiques par rapport au système d'axes, défini en se basant sur la construction, n'ayant été constatée, on peut conclure que le centre magnétique coïncide avec le centre mécanique.

On a constaté par ailleurs, que la composante axiale du champ dans les plans parallèles au plan médian est aussi uniforme que dans le plan médian lui-même dans tout le volume utile de la chambre (les maxima sont légèrement plus prononcés).

On reproduit ci-dessous deux tableaux de valeurs qui ont conduit à ces conclusions.

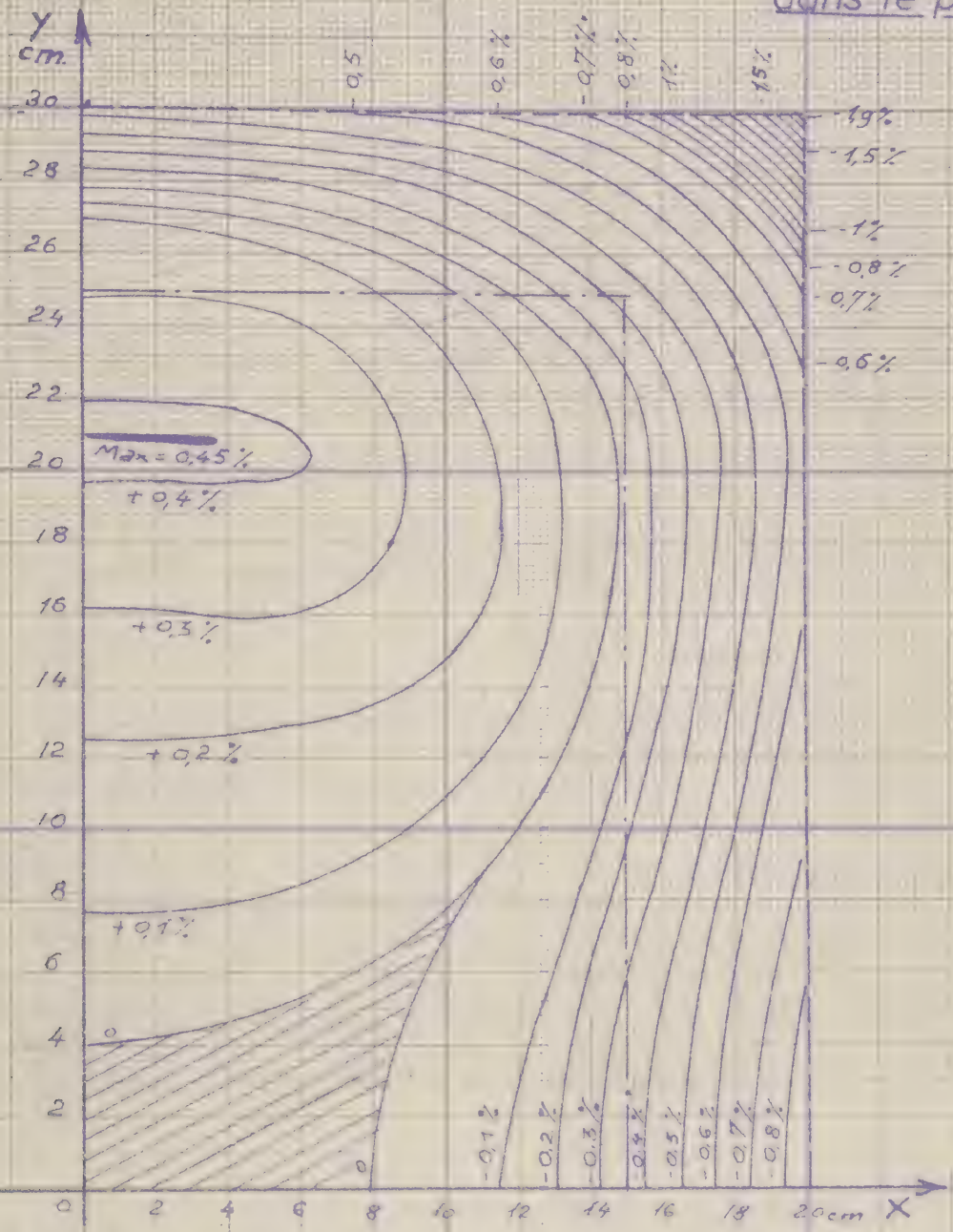
Topographie dans le plan z = 2 pour l'écartement normal; les chiffres indiquant le pourcentage des variations :

x = abscisse du point dans le plan (axe horizontal Ox)

y = ordonnée du point dans le plan (axe vertical Oy)

Graphique X

Topographie de la composante axiale du champ dans le plan median



aucune variation n'est appréciable dans la zone hachurée

bord de la chambre

limite du volume utile de la chambre

x = ⟶ / y = ↓	0	5	10	15	20
0		0	0	- 0,25	- 1
5	0	+ 0,2	+ 0,1	- 0,1	- 0,8
15	+ 0,3	+ 0,4	+ 0,3	0	- 0,6
20	+ 0,45	+ 0,45	+ 0,4	+ 0,25	- 0,5
25	+ 0	+ 0,35	+ 0,25	0	- 0,8
30	- 0,4	- 0,4	- 0,55	- 0,8	- 1,56

Topographie dans le plan z = 4 pour l'écartement normal (120 m/m).

x = ⟶ / y = ↓	0	5	10	15	20
0		0	0	- 0,15	- 0,8
5	0	0	0	- 0,15	- 0,65
10	+ 0,25	+ 0,25	+ 0,1	0	- 0,6
15	+ 0,5	+ 0,4	+ 0,4	+ 0,2	- 0,25
20	+ 0,5	+ 0,45	+ 0,45	+ 0,4	- 0,3
25	+ 0,45	+ 0,45	+ 0,4	+ 0,25	- 0,4
30	- 0,1	- 0,1	- 0,25	- 0,4	- 1,15

Par contre, lorsqu'on augmente l'écart des bobines, l'uniformité est moins bonne dans le plan médian. Le champ est alors maximum au centre et diminue vers les bords, comme le font voir les deux tableaux ci-dessous.

Topographie dans le plan médian pour un écartement de 170 m/m.

x = → / y = ↓	0	5	10	15	20
0		0	- 0,4	- 0,9	- 2,35
5	0	- 0,1	- 0,4	- 0,95	- 2,35
10	0	- 0,1	- 0,45	- 0,95	- 2,4
15	- 0,1	- 0,1	- 0,5	- 0,95	- 2,5
20	- 0,2	- 0,3	- 0,5	- 1,3	- 2,75
25	- 0,9	- 0,9	- 1,1	- 1,55	- 3,25
30	- 2,1	- 2,35	- 2,45	- 3,0	- 5,2

Topographie dans le plan médian pour un écartement de 220 m/m.

x = → / y = ↓	0	5	10	15	20
0		- 0,2	- 0,65	- 1,7	- 3,5
5	- 0,1	- 0,25	- 0,7	- 1,95	- 3,9
10	- 0,1	- 0,25	- 0,75	- 1,9	- 3,8
15	- 0,25	- 0,35	- 0,9	- 2,15	- 3,9
20	- 0,65	- 0,9	- 1,3	- 2,45	- 4,3
25	- 1,3	- 1,5	- 2,1	- 3,25	- 4,95
30	- 2,75	- 3,05	- 3,5	- 4,5	- 6,5

Egalement pour ces écartements, le champ est plus uniforme dans des plans éloignés du plan médian, mais restant tout de même dans le volume utile de la chambre. Le tableau ci-dessous, donnant la topographie de la composante axiale dans le plan z = 4 pour un écartement de 220 m/m, en montre un exemple :

x = → / y = ↓	0	5	10	15	20
0		- 0,15	- 0,45	- 1,35	- 2,75
5	0	- 0,15	- 0,5	- 1,4	- 2,75
10	- 0,1	- 0,15	- 0,5	- 1,5	- 3,15
15	- 0,1	- 0,25	- 0,65	- 1,5	- 3,5
20	- 0,15	- 0,65	- 1,05	- 1,95	- 3,75
25	- 1,2	- 1,40	- 1,95	- 2,85	- 4,15
30	- 2,85	- 3,0	- 3,25	- 4,30	- 5,50

5°) CONCLUSION -

En résumé, on peut dire que cet appareil, destiné à la production d'un champ magnétique pour une chambre de Wilson, répond d'une façon très satisfaisante aux conditions qui ont été imposées, à savoir :

Production d'un champ magnétique d'environ 2.000 oersteds, d'une uniformité supérieure à 1%, avec une puissance inférieure à celle utilisée dans les appareils similaires.

Par ailleurs, le gradient de température dans le volume occupé par la chambre est inférieur à 0,5°C. et le refroidissement est tel qu'il sera possible d'augmenter la puissance jusqu'à 100kw., ce qui permettra d'obtenir un champ magnétique très uniforme de 2.700 oersteds.

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Caen, sous la direction de Monsieur le Professeur SCHERER, avec le concours, pour la construction de l'appareil, de l'Aluminium Français, des Ateliers de Normandie (usine de Caen) et de la Compagnie Electro-Mecanique (usine du Havre).

Je suis heureux d'exprimer ici mes sentiments de vive reconnaissance à Monsieur le Professeur SCHERER pour la confiance dont il m'a honoré et l'intérêt avec lequel il a suivi et guidé mes recherches.

J'adresse mes remerciements respectueux à Monsieur le Professeur LE ROUX, pour l'aide bienveillante et encourageante qu'il m'a toujours apportée.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements aux personnes dont le concours m'a été précieux pour l'exécution du travail, et notamment :

Monsieur JACOMET, Chef de la section Electricité à l'Aluminium Français,

M.CARRIE, Ingénieur aux Ateliers de Normandie, pour l'acoueil si bienveillant que j'ai toujours trouvé auprès d'eux.

Monsieur LOUTREL, Directeur Technique à la Compagnie Electro-Mécanique, qui rendit possible une grande partie de la réalisation, par l'appui matériel de ses services.

Monsieur TSAI, Maître de Recherches au Laboratoire A.Cotton, pour des discussions que nous avons eues avec lui et l'aide qu'il a bien voulu nous apporter dans l'étalonnage de nos appareils de mesure de champs magnétiques.

Je remercie particulièrement le Centre National de la Recherche Scientifique, ainsi que l'Aluminium Français, pour les subventions qu'ils m'ont accordées.

Le cordial concours que j'ai constamment trouvé auprès de mes camarades et du personnel du Laboratoire a beaucoup facilité mon travail.

TABLE DES MATIERES

Page

INTRODUCTION 1

Chapitre I - DIMENSIONNEMENT DES BOBINES 2

A) Paramètres 2

B) Choix de la densité de courant et de la Puissance 10

C) Uniformité du champ dans le volume utile 23

D) Efforts électro-magnétiques 44

Chapitre II - CONSTRUCTION ET MONTAGE DES BOBINES 47

1°) Généralités 47

2°) Conducteur 47

3°) Enroulement 48

4°) Calage et isolement 48

5°) Encombrement des enroulements 49

6°) Caractéristiques électriques 50

7°) Bridage par demi-bobine 51

8°) Cuves 52

9°) Calage de l'enroulement dans les cuves 54

10°) Sortie des connexions 55

11°) Fixation et support des bobines 56

12°) Refroidissement 58

13°) Contrôle de la température des enroulements.. 62

14°) Circuit électrique 63

Chapitre III - EXPERIMENTATION DES BOBINES 64

1°) Essais divers 64

2°) Régime de fonctionnement - Refroidissement .. 65

3°) Gradient de température 67

4°) Champ magnétique et sa topographie 68

5°) CONCLUSION 77

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

LES REDRESSEURS AU SELENIUM

Vu
Le Président de la Thèse :
M. SCHERER

Vu et approuvé

Pour le Doyen de la Faculté
des Sciences :

L'Assesseur,

M. LAFON

Vu et Permis d'imprimer

Le Recteur de l'Académie de Caen,
Président du Conseil de l'Université

P.DAURE